



Titre: Méthode de choix des attachements pour la fin de vie des produits
Title:

Auteur: Thomas Jeandin
Author:

Date: 2015

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Jeandin, T. (2015). Méthode de choix des attachements pour la fin de vie des produits [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/1941/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/1941/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Christian Mascle
Advisors:

Programme: Génie mécanique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MÉTHODE DE CHOIX DES ATTACHEMENTS POUR LA FIN DE VIE DES PRODUITS

THOMAS JEANDIN

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)

JUIN 2015

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

MÉTHODE DE CHOIX DES ATTACHEMENTS POUR LA FIN DE VIE DES PRODUITS

présenté par : JEANDIN Thomas

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. ACHICHE Sofiane, Ph. D, président

M. MASCLE Christian, Doctorat, membre et directeur de recherche

M. BALAZINSKI Marek, Doctorat ès sciences, membre

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche, M. Mascle qui a su me guider tout au long de cette maîtrise en me prodiguant conseils et recommandations mais également pour le soutien financier dont j'ai bénéficié.

Je remercie également Hamidreza et Yongliang qui m'ont apportés des informations précieuses qui m'ont permises de mieux cerner certains problèmes.

RÉSUMÉ

Produits en fin de vie ne rime pas nécessairement avec déchets à éliminer. Bien au contraire ils représentent une source très intéressante de matières premières ainsi que de pièces pouvant être réutilisées. Cependant cet aspect des produits en fin de vie est encore largement sous-exploité. En effet, le désassemblage des produits dans le but de récupérer pièces ou matériaux ne sera effectué que si cela génère un profit suffisant ou si une réglementation s'applique. Hors, étant donné que le traitement en fin de vie est souvent négligé lors de la phase de conception, il en résulte des produits difficiles à désassembler et par conséquent une rentabilité très faible.

Design for disassembly (DfD) est une des solutions proposé pour répondre à ce problème. Parmi cet ensemble de règles et de méthodes, un des points qui a le plus d'impact sur le désassemblage concerne les attachements. En effet, le choix d'un certain type d'attachement pour réaliser un assemblage a un impact sur toutes les phases du cycle de vie d'un produit. L'assemblage et le désassemblage seront plus ou moins aisés, l'aspect du produit pourra être différent, tout comme ses propriétés de résistance et les fins de vie possibles pour les pièces d'un produit seront également différentes. Le fait que les attachements jouent un rôle important dans la conception d'un produit rend le choix difficile car il dépend de nombreux paramètres et il est compliqué pour les concepteurs de définir quel est le choix le plus judicieux.

L'objectif de la méthode proposée est de définir parmi plusieurs alternatives, laquelle sera la plus à même de répondre aux exigences concernant l'assemblage, l'utilisation du produit, sa maintenance et le désassemblage final. Un des autres aspects important, est la prise en compte du désassemblage dit semi-destructif (destruction partielle d'une pièce d'un sous-assemblage pour récupérer les composants ou matériaux de valeurs tout en réduisant le temps de désassemblage et sans perte importante de valeur). Très peu d'articles abordent le sujet du désassemblage semi-destructif bien qu'il peut être particulièrement intéressant. L'ajout du désassemblage semi-destructif dans le modèle garanti un choix d'attachement plus juste et en accord avec les techniques les plus fréquemment utilisées.

La méthode présentée s'appuie principalement sur la méthode d'aide à la prise de décision Analytic Network Process (ANP) afin de déterminer l'alternative la plus intéressante et faciliter

le choix des concepteurs durant la phase de conception. Cette méthode se base sur des comparaisons deux à deux entre les paramètres reliés pour déterminer lequel est le plus important et à quel point et finalement pour déterminer l'alternative la plus intéressante en fonction des choix qui ont été fait. Un aspect nouveau vient du fait que certains paramètres, nommés « Complexité d'assemblage » et « Complexité de désassemblage », sont déterminés préalablement à l'aide de calculs faisant intervenir des paramètres quantitatifs tels que les temps d'assemblage et de désassemblage, ou la ténacité des matériaux. L'intérêt d'utiliser des paramètres quantitatifs est de rendre plus concrète la méthode ANP en remplaçant des comparaisons par des valeurs bien définies et facile d'accès. Les exemples présentés permettent de mieux appréhender les améliorations possibles grâce à cette méthode.

Les différents cas d'application étudiés nous ont permis de mettre en avant plusieurs faits intéressants. Tout d'abord, nous pouvons relever que lorsque l'assemblage est privilégié par rapport aux autres phases du cycle de vie, les attachements solidaires sont bien souvent les plus intéressants et assurent un assemblage rapide et aisé. Cependant, ils sont nettement moins efficaces dès que le produit doit subir des opérations de maintenance ou encore si un désassemblage non-destructif doit être effectué en fin de vie. Dans ce cas, les attachements discrets tels que les vis se montrent plus intéressants grâce à leur capacité à être démontés sans endommager le produit. Enfin, l'intégration du désassemblage semi-destructif dans la méthode nous a permis de mieux considérer les attachements considérés comme permanents (soudure, liaisons adhésives...). En effet, lors que nous considérons le désassemblage, ces alternatives d'attachements semblent peu prometteuses. Malgré tout, le fait de pouvoir désassembler un produit de façon semi-destructive assure une fin de vie intéressante même pour des produits contenant ces types de liaisons. Qui plus est, ces liaisons sont généralement très fiables et assurent la qualité du produit lors de sa phase d'utilisation.

ABSTRACT

End of life products is not necessarily synonymous with waste. On the contrary, they are an excellent source of raw materials and parts that can be reused. However, this aspect of end of life products is still largely under exploited. Product disassembly and the recovery of parts and materials will only take place if there is enough profit generated from the process or if it is regulated. But as the end of life is often overlooked during the design process it makes the disassembly hard to perform and therefore the profitability is especially reduces.

Design for disassembly (DfD) is one of proposed solutions to solve this problem. Fasteners are one of the points that impact the much on the disassembly of products. The aim of the proposed model is to determine among several alternatives which one allows to meet the requirements in assembly, in-use, services and disassembly. Another important considered aspect in this model is the semi-destructive disassembly (deteriorate a part of a sub-assembly to recover valuable components or materials and while reducing the disassembly time and without important value loss). This ensures to select a fastener more precisely and according to the most used technics. Even if semi-destructive disassembly may be especially attractive in some cases, it is rarely addressed in the literature.

The model developed in this paper is based mainly on the Analytic Network Process (ANP) to define the best alternative and make easier the fastener selection during the design process. A new aspect is that some parameters are previously determined thanks to calculations involving quantitative parameters such as assembly time and disassembly time or material toughness. The interest of these quantitative parameters is to make more concrete the ANP model by replacing pairwise comparisons by well-defined values easy to obtain. Two examples are presented for a better comprehension of the possible improvements brought by this model.

The various case of applications studied allowed us to highlight several interesting facts. First, we can observe that when the assembly is privileged compared to other phases of the life cycle, the integral attachments are often the most interesting and provide a quick and easy assembly. However, they are significantly less effective if the product has to undergo maintenance or if a non-destructive disassembly must be done. In this case, the discrete attachments such as screws are more interesting thanks to their ability to be taken apart without

damaging the product. Finally, integrate the semi-destructive disassembly in the method has allowed us to better consider the attachments considered as permanent. Indeed, when we consider the disassembly these alternatives seem unpromising. Still, being able to disassemble a product thanks to a semi-destructive method provides a very interesting end of life for products containing these types of alternatives. Furthermore, these fasteners are generally very reliable and ensure the quality of the product during its use.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES FIGURES.....	XII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XIII
LISTE DES ANNEXES.....	XIV
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Comment faire changer les choses	1
1.2 Les solutions possibles pour diminuer l’impact environnemental d’un produit	3
1.3 L’importance des attachements dans la conception d’un produit	3
1.4 Plan de lecture	4
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	5
2.1 La place des attachements dans la conception des produits.....	5
2.2 La fin de vie des produits	6
2.3 Le désassemblage.....	7
2.4 Les méthodes existantes	11
2.5 Objectifs de la recherche	14
2.6 La démarche suivie.....	15
CHAPITRE 3 DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODE	17
3.1 La méthode Analytic Network Process (ANP)	17

3.1.1	Le choix de cette méthode.....	17
3.1.2	Le fonctionnement de la méthode ANP	18
3.1.3	Limites de la méthode ANP	21
3.2	Les paramètres pris en compte	22
3.2.1	Critères de choix.....	22
3.2.2	Sélection des paramètres	22
3.3	Calculs des complexités d'assemblage et de désassemblage	36
3.3.1	La méthode utilisée	36
3.3.2	Les paramètres de la complexité d'assemblage	36
3.3.3	Les pondérations choisies pour les paramètres d'assemblage	39
3.3.4	Exemple d'application.....	41
3.3.5	Les paramètres de la complexité de désassemblage non destructif	43
3.3.6	Les pondérations choisies pour les paramètres de désassemblage non destructif.....	48
3.3.7	Les paramètres de la complexité de désassemblage semi destructif	48
3.3.8	Les pondérations choisies pour les paramètres de désassemblage semi destructif	51
3.3.9	Prise en compte des pertes de valeurs	51
3.4	Application de la méthode ANP.....	57
3.4.1	Le réseau	57
3.4.2	La matrice de connexion	58
3.4.3	Les matrices de comparaison pour les paramètres	61
3.4.4	Les modèles d'attachements.....	62
3.4.5	L'importance donnée aux différentes phases du cycle de vie	64
3.4.6	La démarche à suivre.....	64
3.4.7	Création des programmes informatiques.....	67

CHAPITRE 4	EXEMPLES D'APPLICATION DE LA MÉTHODE.....	68
4.1	Premier cas d'application	68
4.1.1	Les alternatives envisagées	68
4.1.2	Les situations envisagées	72
4.1.3	Première situation : Récupération des matériaux	72
4.1.4	Deuxième situation : Récupération des pièces	79
4.2	Deuxième cas d'application	82
4.2.1	Les alternatives d'attachements envisagées	83
4.2.2	Les modifications apportées à la méthode ANP	87
4.2.3	Les résultats obtenus	88
4.2.4	Discussion sur le fonctionnement de la méthode et les résultats obtenus	90
CHAPITRE 5	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	94
BIBLIOGRAPHIE	97
ANNEXES	101

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Exemple de matrice de comparaison.....	20
Tableau 3.2 : Echelle de comparaison utilisée dans la méthode ANP	20
Tableau 3.3 : Les paramètres influençant l’assemblage et les références correspondantes	26
Tableau 3.4 : Les paramètres influençant la phase d’utilisation et les références correspondantes	30
Tableau 3.5 : Les paramètres influençant le désassemblage et les références correspondantes...	34
Tableau 3.6 : Pondérations des paramètres assemblage.....	20
Tableau 3.7 : Pondérations choisies pour la complexité de désassemblage non destructif	48
Tableau 3.8 : Les différents cas en désassemblage semi destructif	51
Tableau 3.9 : Données nécessaires au calcul des pertes de valeur	53
Tableau 3.10 : Matrice de connexion simplifiée	59
Tableau 3.11 : Forme générale de la matrice de connexion.....	60
Tableau 3.12 : Matrice de comparaison pour le paramètre P6.....	61
Tableau 4.1 : Résultats pour la première situation	75
Tableau 4.2 : Résultats pour la deuxième situation.....	81
Tableau 4.3 : Résultats obtenus pour l’assemblage du circuit imprimé.....	89

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 : Exemple de réseau	19
Figure 3.2 : Échelle d'effort de démontage (Sonnenberg, 2001)	44
Figure 3.3 : Temps de désassemblage en fonction de la durée d'utilisation (Kondo, Deguchi, Hayashi & Obata, 2003).....	46
Figure 3.4 : Réseau de la méthode ANP	58
Figure 3.5 : Démarche d'utilisation de la méthode	65
Figure 4.1 : Assemblage vis-écrou	69
Figure 4.2 : Vue du positionnement des trous lamés	70
Figure 4.3 : Assemblage par clips cantilever	71
Figure 4.4 : Vue éclatée de l'assemblage vissé	84
Figure 4.5 : Pièce intermédiaire de fixation	85
Figure 4.6 : Vue éclatée de l'assemblage emboité	86

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ANP	Analytic Network Process
Cre	Coût de remise en état
DfD	Design for Disassembly
DfX	Design for X
Pvol	Pertes de volume
Rval	Rapport de valeur
Rvol	Rapport de volume

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 – Tableau de calcul des complexités pour le 1 ^{er} cas d'application	101
Annexe 2 – Tableau de calcul des pertes de valeurs pour le 1 ^{er} cas d'application	102
Annexe 3 – Tableau de calcul des pertes de valeurs pour la deuxième situation et nouveau tableau de calcul des complexités de désassemblage	103
Annexe 4 – Tableau de calcul des complexités pour le 2 ^{ème} cas d'application.....	104
Annexe 5 – Tableau de calcul vierge	105
Annexe 6 – Tableau vierge de calcul des pertes	106
Annexe 7 – Explication des tableaux de calculs	107

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Au cours des dernières décennies nous avons progressivement pris conscience que nous ne pouvions plus continuer à exploiter sans limite nos ressources naturelles dans le seul but de maintenir une croissance économique élevée. Il est dorénavant nécessaire de penser différemment et de ne plus seulement se soucier de produire et produire toujours plus. Les conséquences des pollutions engendrées par la production d'énergie, ainsi que de biens matériels sur notre environnement ne sont plus à présenter. Il est vital d'agir efficacement dans le but de réduire l'impact des activités humaines et de préserver notre environnement. Pour cela, il est nécessaire d'apporter des changements à nos méthodes de production qui sont responsables de nombreux problèmes environnementaux tels que les changements climatiques, l'érosion de la biodiversité, l'épuisement des ressources naturelles. Ces problèmes doivent être la préoccupation de tout le monde et en particulier des industriels qui ont depuis trop longtemps négligés l'aspect environnemental. La nécessité d'agir n'est plus à prouver, la question à se poser dorénavant est comment parvenir à faire changer les choses.

1.1 Comment faire changer les choses

Il existe de nombreuses façons d'agir pour aller dans la direction du respect de l'environnement et du développement durable, nous nous intéresserons plus particulièrement aux problèmes liés aux activités industrielles. Pendant de nombreuses années l'objectif des entreprises a été de se développer toujours plus et de générer toujours plus de profits, et cela bien évidemment au dépend de l'environnement. Certaines ressources naturelles ont été surexploitées et risquent de devenir très difficiles d'accès voire même totalement épuisées. Nous pouvons citer le cas du cuivre, de l'argent ou encore du zinc, des ressources qui risquent d'être épuisées d'ici les années 2050 si nous continuons à les exploiter de la sorte (Eco-3e, 2013). Parvenir à faire prendre conscience aux industriels qu'ils ne peuvent plus continuer à produire de cette façon n'est pas une tâche aisée et il est bien souvent nécessaire de leur imposer des normes et des réglementations.

De plus en plus de pays mettent place des réglementations en matière de respect de l'environnement visant à modifier le comportement des industriels. Les réglementations peuvent s'attaquer à différents points. Nous pouvons par exemple citer la directive européenne RoHS qui

signifie « Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic ». Cette directive vise à limiter l'utilisation de certaines substances considérées comme dangereuses (plomb, mercure, cadmium...) dans les produits électroniques. L'intérêt d'une telle directive est de réduire la quantité de déchets dangereux générée en limitant leur utilisation dès le début. Nous pouvons également citer la directive DEEE qui force les fabricants à assumer les coûts de traitement des produits électriques et électroniques arrivés en fin de vie (Eco-3e, 2013). Leur imposer cela est sensé les forcer à s'impliquer dans les démarches de développement durable. Au premier abord, le fait de prendre en compte le traitement en fin de vie d'un produit durant la phase de conception peut sembler être un réel frein et présenter beaucoup de contraintes. Cependant, des profits non négligeables peuvent être réalisés à partir du traitement des produits en fin de vie mais pas seulement des profits. En effet, le traitement en fin de vie des produits est une source importante en matériaux et en composants et permet des économies d'énergies conséquentes. A titre d'exemples, la réutilisation d'alliages d'aluminium permet une économie d'énergie de près de 95%, celle du cuivre une économie de 85% (Cui & Forssberg, 2003). Ces matériaux issus du recyclage fournissent une source très intéressante de matières premières, permettent de préserver les ressources naturelles et de réaliser d'importantes économies d'énergie, des réductions des pollutions de l'air, du sol et de l'eau et également une diminution des déchets générés. De plus, une étude menée à Wichita aux Etats-Unis dans un centre de retraitement d'avions montre clairement les gains qui peuvent être réalisés, aussi bien sur le plan économique qu'environnemental (Asmatulu, Twomey & Overcash, 2013). Annuellement les opérations de désassemblage et de revalorisation permettent de réduire la consommation énergétique de 841 MJ ainsi que de diminuer les émissions de CO₂ de plus de 61 millions de kilogrammes par rapport à la production conventionnelle des matériaux concernés. Nous disposons de grandes quantités de matières premières sous formes de produits en fin de vie mais encore faut-il être capable de les récupérer. Certaines entreprises ont bien compris cela et développent des produits toujours plus performants lors de l'utilisation mais également lors du traitement en fin de vie.

Un autre point qui tend à inciter les industriels à développer des produits écoresponsables concerne la satisfaction des clients. En effet, les clients sont de plus en plus conscients de l'importance de l'environnement et celui-ci rentre désormais en compte lorsqu'ils ont un choix à

faire. L'environnement est même devenu un point de marketing dans certains domaines. Les industriels ont donc tout intérêt à prendre en compte l'évolution de la mentalité de leurs clients afin de continuer à les satisfaire.

Les industriels sont forcés de prendre de plus en plus en considération le respect de l'environnement, il a donc fallu trouver des solutions pour rendre les produits plus écoresponsables, ce qui correspond finalement à réduire l'impact qu'ils auront sur l'environnement une fois la production lancée.

1.2 Les solutions possibles pour diminuer l'impact environnemental d'un produit

Au cours de son cycle de vie un produit traverse plusieurs phases, il est tout d'abord conçu, puis assemblé avant d'être mis en service. Après une certaine durée d'utilisation, le produit sera mis au rebut pour être par la suite retraiter ou non, suivant les options de fin de vie choisies par les industriels. Dans le but de diminuer l'impact environnemental il est donc possible d'agir sur une ou plusieurs de ces phases. Nous pouvons distinguer deux grands types d'actions. La première consiste à agir sur la pollution elle-même. Cette solution est loin d'être la plus efficace car étant donné la croissance économique, la production de biens est de plus en plus importante et par conséquent la quantité de déchets l'est également si aucune autre action n'est mise en place. L'autre solution consiste à agir à la source du problème. Il est bien plus intéressant de concevoir un produit contenant moins de matériaux polluants ou avec une meilleure efficacité énergétique. Cela va permettre de générer une quantité bien moins importante de polluants. Prendre en compte l'environnement le plus tôt possible lors de la conception d'un produit est une solution efficace, c'est pour cette raison que de nombreux outils ont été développés pour aider les concepteurs à faire des choix bien pensés. Nous verrons dans le chapitre suivant quelque uns de ces outils visant à guider le concepteur vers la bonne solution.

1.3 L'importance des attachements dans la conception d'un produit

Dans l'optique de faciliter la renaissance des produits il est important de prendre en compte tous les aspects du cycle de vie d'un produit. Le cycle de vie d'un produit peut être séparé

en trois phases principales, l'assemblage, phase durant laquelle l'ensemble des pièces est assemblées pour créer le produit, ensuite vient la phase d'utilisation du produit, et finalement lorsque le produit n'est plus utilisé il entre dans la phase de fin de vie durant laquelle il devra être traité dans le but d'être recyclé ou remis en état par exemple, un désassemblage complet ou partiel est souvent nécessaire. En ne considérant que les problèmes liés à l'assemblage ou à l'utilisation comme cela est bien souvent le cas il est difficile de pouvoir traiter efficacement un produit arrivé en fin de vie. Il est nécessaire de tenir compte des problèmes liés au désassemblage afin de concevoir un produit aisément démontable et par conséquent assurer une fin de vie la plus écoresponsable possible. Une des étapes les plus importantes du désassemblage consiste à retirer les attachements qui assurent les liaisons entre les différentes pièces et sous-assemblages d'un produit. Suivant le type d'attachement choisi le désassemblage est plus ou moins long et difficile et permet ou non la récupération des pièces dans le but de les réutiliser. Les concepteurs ont donc tout intérêt à bien choisir les attachements qu'ils utilisent. Cependant ce choix est loin d'être évident car de nombreux paramètres rentrent en compte et le choix d'un attachement impacte toutes les phases du cycle de vie d'un produit.

1.4 Plan de lecture

Le mémoire est composé de quatre chapitres, le premier chapitre qui a été présenté juste avant permet d'introduire le problème posé par l'environnement et les activités humaines. Le second chapitre sera constitué d'une revue de littérature visant à présenter les principaux problèmes rencontrés lors de la phase de choix, différentes méthodes utilisées pour déterminer le meilleur attachement possible, ainsi que d'autres méthodes directement liées au choix des attachements et qui pourront être utilisées pour définir certains paramètres. Nous détaillerons également les objectifs de la recherche et la démarche utilisée qui a été suivie pour parvenir à l'élaboration et à la validation de la méthode de choix des attachements présentée. Dans la partie suivante, nous détaillerons l'ensemble des étapes que nous avons suivies et les choix que nous avons faits pour mettre en place cette méthode. La quatrième partie regroupe deux exemples de mise en application de la méthode. Enfin nous terminerons par une conclusion et nous présenterons les perspectives de recherche.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Rendre un produit plus écoresponsable est loin d'être simple car de nombreux points doivent être pris en compte dont le choix des attachements. Dans ce chapitre nous allons présenter un état de l'art sur les différentes méthodes d'aide au choix des attachements qui ont déjà été mises au point. Nous allons également voir les différents aspects qui influencent le choix d'un attachement.

2.1 La place des attachements dans la conception des produits

L'importance de plus en plus grande du respect de l'environnement dans l'industrie a permis l'émergence de nouvelles méthodes visant à guider les concepteurs afin de parvenir à des produits toujours plus respectueux de l'environnement. Ces méthodes de conception peuvent être rassemblées au sein du Design for X (DfX). Il existe un grand nombre de sous classes qui se focalisent chacune sur une partie différente du cycle de vie d'un produit. Nous pouvons par exemple citer le Design for Assembly qui regroupe toutes sortes de méthodes visant à rendre les produits plus facilement et efficacement assemblables. Le Design for Recycling est quant à lui axé sur l'optimisation du recyclage des produits. Celui qui nous concerne est le Design for Disassembly (DfD) qui vise à faciliter le désassemblage des produits afin d'en assurer une meilleure valorisation (Kroll & Hanft, 1998).

Le choix des attachements est une partie intégrante du DfD et différents articles présentent des guides d'aide à la conception qui contiennent des règles de conception qui doivent permettre aux concepteurs d'améliorer leur produit. Nous pouvons citer un article paru en 2003 (Xing, Abhary & Luong, 2003) qui présente 20 règles s'appliquant au choix des matériaux et des attachements. Il est par exemple préconisé d'utiliser des attachements standards, de minimiser leur nombre et la variété d'attachements. Ces règles sont un premier pas vers un choix judicieux d'attachements et elles permettent d'éviter facilement des erreurs dans le choix d'un attachement. Un autre aspect important qui est présent dans ces règles concerne la fin de vie choisie pour les pièces. En effet, le choix d'un certain type d'attachement peut limiter les fins de vie possibles pour les pièces. Nous allons nous intéresser à cet aspect dans la partie suivante.

2.2 La fin de vie des produits

Comme nous l'avons présenté précédemment, le choix d'un attachement influence directement les fins de vie possibles pour les différentes pièces d'un produit. Remery (Remery, 2012) définit 6 fins de vies possibles pour un produit :

- **Réutilisation** : Le composant est nettoyé avant d'être directement réutilisé pour une quelconque application.
- **Mise à niveau** : Le composant est réparé et/ou subit une série de modifications pour être revendu en tant que produit remanufacturé.
- **Recyclage après désassemblage** : Dans ce cas le produit est démonté dans le but de séparer les différents matériaux pour les recycler par la suite.
- **Recyclage sans désassemblage** : Le produit ne subit aucun traitement avant d'être broyé et ainsi permettre le tri et la récupération des matériaux intéressants grâce à différents procédés.
- **Incinération avec récupération d'énergie** : Le produit est directement incinéré afin de produire de l'énergie.
- **Mise en décharge** : Le produit est simplement mis en décharge.

Parmi ces fins de vies il est évident que certaines sont nettement plus intéressantes autant sur le plan écologique qu'économique. La mise en décharge des produits représente l'option la moins bonne. En effet, le fait d'entasser d'énormes quantités de produits usagés dans des décharges engendre de nombreux problèmes et n'est pas vraiment en accord avec les objectifs du DfD car le produit est purement et simplement mis au rebus sans même essayer de le valoriser. Ensuite, le fait d'incinérer les produits afin de produire de l'énergie est déjà plus intéressant mais encore loin d'être optimal. Les fins de vie qui consistent à recycler les matériaux d'un produit sont fréquemment mises en place. Broyer un produit puis trier les morceaux obtenus est une solution facile à mettre en place dans la majorité des cas car elle ne requiert pas de conception spécifique des produits pour faciliter le désassemblage. Le principal problème réside dans le fait de parvenir à trier les matériaux et non à séparer les pièces. Enfin, les dernières possibilités de fin de vie sont nettement plus avantageuses sur de nombreux points. Le fait de parvenir à récupérer une pièce qui pourra ensuite être réutilisée permet généralement de réduire les coûts et les temps

de production, mais également de diminuer les pollutions causées par la fabrication (Duflou, Seliger, Kara, Umeda, Ometto & Willems, 2008).

Lors de la conception d'un produit il est primordial de bien déterminer pour chaque pièce ou sous assemblage une fin de vie. Cela va permettre de faire des choix d'attachements, de matériaux, de géométries, etc. cohérents et ainsi éviter au minimum de fabriquer des produits trop difficiles à désassembler qui devront être broyés ou incinérés alors qu'il aurait été possible de réutiliser les pièces en ayant fait les bons choix lors de la conception.

2.3 Le désassemblage

Le fait de désassembler un produit est loin d'être simple et il ne suffit pas d'effectuer les opérations inverses de l'assemblage. Le désassemblage est encore mal compris malgré les nombreuses recherches menées sur le sujet. Il peut être défini comme le fait de séparer d'un produit différents composants ou sous-assemblages afin de récupérer des pièces ou des matériaux qui seront valorisés par la suite sous diverses formes suivant la fin de vie choisie pour chacun. Cette action correspond au fait de supprimer les liens créés entre les pièces lors de l'assemblage. Ces liens correspondent aux attachements. Sonnenberg (Sonnenberg, 2001) présente une définition très claire de cette action : « Unfastening is the process of separating components or subassemblies from each other by removing fasteners or by detaching parts with integral attachments usually with or without the use of a tool ». La facilité de désassemblage d'un produit va être largement influencée par le choix des attachements et un mauvais choix lors de la phase de design risque de pénaliser la rentabilité du recyclage ou de limiter les fins de vie envisageables.

Le principal frein au recyclage vient donc du fait qu'il est nécessaire de désassembler. Or, désassembler des produits qui n'ont pas été pensés pour cela peut s'avérer très, voir trop complexe. En effet, si le temps passé à désassembler un composant est trop important, la rentabilité va être fortement diminuée voire même être négative. L'étude du désassemblage d'un tableau de bord de voiture permet d'illustrer cela (Chen, Navin-Chandra & Prinz, 1993). Deux méthodes sont mises en application. La première méthode, qui est celle utilisée habituellement, consiste à démonter la radio puis à broyer le reste du tableau de bord et trier les différents matériaux. La seconde méthode consiste à démonter complètement le tableau de bord. Le bilan

met en avant le fait que la première méthode est bien plus avantageuse économiquement parlant, car le temps de traitement est nettement moins long (près de 7 fois). La seconde méthode conduit à un bilan économique largement négatif car le fait de démonter chaque composant est bien trop long par rapport au prix des pièces récupérées. Des tests supplémentaires ont été effectués après avoir modifié certains attachements présents dans le tableau de bord. Un gain de temps a pu être réalisé grâce à ces modifications et a permis de minimiser les pertes.

Une des parties la plus importante lors du désassemblage correspond à la suppression des attachements pour libérer les pièces. Toutes les actions que cela représente ne sont finalement qu'une perte de rentabilité. En effet plus le temps pour séparer deux pièces est long et moins il deviendra intéressant de le faire. Par conséquent, désassembler complètement un produit afin de récupérer ses composants est très rarement la meilleure alternative. Il existe cependant des exemples qui montrent à quel point intégrer le traitement pour la fin de vie dans la conception d'un produit peut être intéressant. C'est le cas pour les appareils photos jetables de la marque Fuji. Ils sont à 95% réutilisés grâce à une ligne entièrement automatisée qui assure le remanufacturing du produit (nettoyage, remplacement des pièces usagées et remise en service) (Duflou, Seliger, Kara, Umeda, Ometto & Willems, 2008). Dans ce cas précis, le design du produit a été spécifiquement pensé afin de pouvoir être facilement remis en service et permet des gains conséquents. Dans la majorité des cas le désassemblage entièrement automatisé est impossible car de telles lignes de désassemblage sont très spécialisées et n'opèrent que sur un nombre très limité de produits différents. Pour que ces lignes soient rentables il est nécessaire de traiter une grande quantité de produits, or les produits sont très souvent mélangés à d'autres lors de la récupération et de nombreux problèmes se posent pour les retraiter efficacement (Kopacek & Kopacek, 2006). Des lignes de démontage flexibles sont en développement et doivent faire face à des problèmes tels que la diversité des produits qui engendre une grande diversité de formes, d'attachements, de matériaux différents, de conceptions différentes, etc. Considérant ces problèmes, le désassemblage se fait donc principalement manuellement.

Contrairement aux opérations d'assemblage où les pièces sont en parfait état, lors du désassemblage, les produits sont bien souvent endommagés. Ces dommages ne facilitent pas le désassemblage et peuvent même empêcher la récupération des pièces. De plus les produits à désassembler sont généralement issus de différents fabricants, et donc les conceptions ne sont pas

les mêmes ce qui oblige d'être capable de s'adapter à cette variété. Vongbunyong et Chen (Vongbunyong & Chen, 2015) ont dressés une liste des principaux facteurs qui affectent le désassemblage. Nous pouvons citer par exemple :

- L'état des pièces et des attachements : Plus ils seront endommagés et plus le désassemblage risque d'être difficile.
- La diversité des produits qui entraîne une grande diversité de conceptions. La structure du produit est différente d'un fabricant à un autre, tout comme l'emplacement des composants et attachements.
- L'ordonnancement des opérations de désassemblage est également un problème car pour assurer un désassemblage efficace il est nécessaire de bien connaître la structure du produit, les pièces intéressantes et jusqu'à quel point il faut désassembler un produit.

Pour pallier à ces problèmes différentes solutions ont été envisagées. Tout d'abord, un point que nous pouvons relever est la signalisation des attachements. Étant donné la conception de certains produits il est parfois difficile de localiser et d'identifier les attachements présents dans un produit. Dans ce cas les opérations de désassemblage sont difficiles et peuvent conduire à une dégradation du produit car une mauvaise stratégie de désassemblage ou un mauvais outil a été utilisé. Certains fabricants ont donc décidés de réaliser des marquages sur les pièces afin de signaler la présence d'un attachement et éventuellement la direction de désassemblage. Ces simples marquages sont une aide précieuse et rend le désassemblage plus instinctif. Un autre point que nous pouvons relever concerne les attachements dit, intelligents. Le principe de ce type d'attachement repose sur une géométrie particulière des pièces qui va permettre de désassembler les pièces presque sans efforts. Plusieurs techniques sont possibles comme l'utilisation de matériaux répondant à la chaleur ou au magnétisme associés à une conception spécifique (Duflou, Seliger, Kara, Umeda, Ometto & Willems, 2008), (Sun, Huang, Lu Wang, Zhang, 2014). Avec de tels attachements, lors du désassemblage il suffit de chauffer le produit ou d'appliquer une force électromagnétique pour que l'attachement se libère de lui-même. Il ne reste ensuite plus qu'à séparer les pièces. Ces attachements sont encore peu utilisés mais ils représentent une alternative intéressante qui pourrait permettre de faciliter considérablement le désassemblage.

En revenant à des techniques de désassemblage plus conventionnelles, nous allons voir que plusieurs possibilités sont envisageables. Le désassemblage peut se réaliser d'une façon non destructive : les attachements sont retirés afin de récupérer la pièce voulue (dévisser, débloquer des emboîtements...). Cette méthode est appelée non destructive car le composant reste intact et peut être réutilisé. La seconde méthode est dite destructive. Le produit est passé au broyeur afin de le réduire en morceaux de petites tailles qui seront ensuite triés grâce à différentes techniques. Enfin la dernière méthode est dite semi-destructive. Dans ce cas, une partie du produit est détruite afin de libérer plus facilement le composant le plus intéressant. Des outils spécialisés peuvent être requis pour, par exemple, briser des têtes de vis (Pak & Sodhi, 2002) ou encore scier une partie pour en récupérer une de plus grande valeur. Le principal intérêt de cette méthode est le gain de temps. En effet, le temps mis pour scier une pièce est bien souvent plus faible que celui pour dévisser 6 vis. Ce choix peut également être nécessaire si le produit a subi des dégradations qui rendent le désassemblage non destructif impossible. Cet aspect du désassemblage malgré son intérêt est très peu documenté. Il constitue d'ailleurs un élément très intéressant à prendre en compte dans une méthode d'aide au choix des attachements car c'est une technique de désassemblage fréquemment utilisée.

Le choix des attachements représente un facteur clé dans le traitement des produits en fin de vie. Selon Sonnenberg (Sonnenberg, 2001) nous pouvons distinguer 5 grands types d'attachements :

- **Les attachements discrets**, qui regroupent deux grandes catégories. D'un côté les attachements filetés (vis, écrous...), de l'autre les attachements non filetés (rivets, goupilles...). Leur principale caractéristique est d'être totalement indépendant des pièces à assembler et ne causent pas de dommages. Ils peuvent donc être retirés et réutilisés si leur état le permet.
- **Les attachements solidaires**, qui sont intégrés directement dans les pièces et permettent de les assembler sans ajouter de pièces supplémentaires.
- **Les colles**, qui sont présentes sous de nombreuses compositions chimiques suivant les matériaux, les conditions, les efforts...

- **Les assemblages avec apport d'énergie**, tels que la soudure ou le brasage. Cette méthode réalise une liaison permanente entre les pièces et engendre des déformations au niveau de la zone de contact.
- Le reste, qui regroupe des techniques telles que les zips ou le sertissage.

Chacun des 5 types d'attachements possède des caractéristiques propres qui influencent leur comportement lors de l'assemblage, de l'utilisation et du désassemblage. En fonction de la fin de vie déterminée, il sera nécessaire d'opter pour le type d'attachement qui répond le mieux aux différentes exigences. Aucun d'eux n'est parfait et le choix est toujours une question de compromis. Le principal problème à surmonter est le nombre important de facteurs qui rentrent en ligne de compte dans le choix du meilleur attachement possible. Il est en effet aisé de trouver des informations sur les temps d'assemblage de tel ou tel attachement ou encore ses caractéristiques mécaniques. Cependant, il faut parvenir à prendre en compte l'ensemble de ces paramètres pour réaliser les choix le plus juste possible. Plusieurs méthodes tentent d'apporter une solution efficace à ce problème.

2.4 Les méthodes existantes

La littérature est pauvre en ce qui concerne les méthodes d'aide au choix des attachements. Nous allons détailler par la suite deux méthodes spécifiquement développées autour de cette problématique. Toutefois, il est intéressant de se pencher sur d'autres méthodes qui s'intéressent au problème du désassemblage. En effet, ces méthodes qui s'intéressent principalement à l'évaluation des temps de désassemblage ou à l'optimisation de la conception d'un produit, nous fournissent des informations intéressantes et peuvent être des outils utiles car les attachements sont directement en lien avec cela.

L'évaluation du temps de désassemblage est un des points les plus étudié, ce qui est tout à fait logique car il est un des paramètres les plus influant. Il est en lien direct avec les coûts de désassemblage et donc la rentabilité. C'est également un bon indicateur de la qualité de la conception d'un produit devant être désassemblé. Amelia et son équipe l'utilise d'ailleurs comme paramètre principal pour évaluer différentes alternatives de conception d'une portière de voiture (Amelia, Wahab, Ismail & Che Haron, 2009). L'évaluation du temps de désassemblage d'un produit peut être utile pour déterminer les opérations trop longues qui réduisent la rentabilité. Une

fois que ces opérations sont connues il est possible de d'apporter des modifications à la conception du produit ou aux attachements utilisés afin de réduire la durée de désassemblage. Cette solution est une première possibilité, cependant prendre seulement en ligne de compte le temps de désassemblage est bien trop réducteur. Le choix d'un attachement influence toutes les phases du cycle de vie d'un produit et choisir un type ou un autre va impliquer l'utilisation d'outils appropriés, une conception adaptée, les opérations d'assemblage et de désassemblage seront différentes et encore bien d'autres points sont impactés. Certaines vont dans ce sens et prennent plus de paramètres en compte. C'est par exemple le cas d'une méthode développée par Das et son équipe (Das, Yedlarajiah & Narendra, 2000). Dans celle-ci il cherche à déterminer le coût du désassemblage. Pour cela il calcule un score appelé « Disassembly Effort Index » (DEI) en se basant sur différents paramètres comme les outils, le système de fixation, le temps, la direction d'accès ou la force. Une fois ce score déterminé il est en mesure de calculer le coût du désassemblage d'un produit. Avec cette méthode il est possible d'analyser différentes alternatives de conception d'un produit et de déterminer laquelle est la plus intéressante d'un point de vue coût.

Nous allons maintenant nous intéresser plus en détail aux méthodes spécifiquement dédiées au choix des attachements. La première a été développée par Güngör (Güngör, 2006) et s'appuie sur la méthode de calcul ANP (Analytic Network Process) développée par Saaty (Saaty, 1996). Cette méthode d'aide à la prise de décision permet d'apporter des solutions à des problèmes complexes qui requièrent d'évaluer l'influence de différents facteurs dans le but de choisir la meilleure alternative. Cette méthode est utilisée avec succès dans toutes sortes de domaines de connaissances (économie, politique, technologie, etc.). Son atout majeur réside dans le fait qu'elle permet de prendre le système dans son ensemble et de déterminer le meilleur compromis. Plus concrètement, pour mettre en place cette méthode il est tout d'abord nécessaire de créer le réseau de paramètres avec tous les relations qui existent entre chacun d'eux. Les paramètres traitant du même aspect sont rassemblés dans des groupes et il est nécessaire de déterminer l'importance de chacun de ces groupes dans le problème global. Une fois ce travail fait, l'influence de chaque paramètre est déterminée en réalisant des comparaisons deux à deux entre les paramètres reliés. Finalement, ces influences sont regroupées au sein d'une matrice globale qui va permettre de déterminer l'alternative envisagée la plus intéressante. Dans le cas

précis de la méthode de Güngör, le problème est articulé autour de 3 axes : l'assemblage, l'utilisation du produit et le désassemblage. Chacun de ces 3 groupes contient des paramètres tels que le nombre d'éléments d'attachements nécessaires ou la complexité du mouvement de désassemblage. L'objectif est de classer les alternatives qui correspondent aux 5 types d'attachements défini par Sonnenberg (Sonnenberg, 2001). Plusieurs configurations ont été testées en modifiant l'importance donnée à chacun des 3 axes allant de égale importance jusqu'à la prise en compte de seulement un axe. Les principaux résultats que nous pouvons tirer de ses recherches sont les suivants :

- Lorsque les 3 axes ont une égale importance, les attachements solidaires sont à privilégier (33%) puis les attachements discrets (20%).
- Si seulement le désassemblage est pris en compte les attachements discrets sont les plus intéressants (47%).
- Par contre lorsque l'assemblage ou l'utilisation sont valorisés les attachements solidaires semblent plus intéressants que les autres.

Dans la pratique, pour utiliser cette méthode il est nécessaire de tout d'abord définir quelles sont les alternatives envisageables pour réaliser l'assemblage pour ensuite les analyser par le biais de la méthode ANP et ainsi faire ressortir les plus intéressantes d'après les choix effectués. Cette démarche peut être longue et fastidieuse si le nombre d'alternative est important. En effet, plus les alternatives sont nombreuses et plus le nombre de comparaisons deux à deux à faire sera important. Cela limite quelque peu son intérêt pour une utilisation lors de la conception préliminaire du produit durant laquelle il est nécessaire de pouvoir obtenir rapidement des informations pour apportées les modifications au produit.

La seconde méthode est plus récente et a été développée par l'équipe de Ghazilla (Ghazilla, Taha, Yusoff, Rashid & Sakundarini, 2014). Dans cette méthode, l'outil de décision PROMETHEE est utilisé pour parvenir au résultat. La méthode met surtout en avant des critères reliés au désassemblage mais le temps d'assemblage et les coûts relatifs aux attachements sont également pris en compte car ils ont une influence importante sur le choix final. Les attachements envisagés se limitent aux attachements permettant de réaliser un désassemblage non destructif de l'assemblage. Le fonctionnement de la méthode PROMETHEE est quelque peu différent de celui de la méthode ANP mais les objectifs sont les mêmes. Un des intérêts de cette méthode est de

pouvoir utiliser des paramètres qualitatifs mais également quantitatifs ce qui est impossible avec la méthode ANP où seulement une évaluation qualitative est possible. L'intérêt de pouvoir utiliser des données quantitatives vient du fait de la précision de ces données et qu'elles ne résident pas seulement sur le jugement de l'utilisateur. Un exemple est traité dans cette étude. Il consiste à déterminer la meilleure alternative parmi quatre pour l'assemblage d'une portière de voiture. Suivant les importances données aux différents groupes, les résultats mettent en avant différentes alternatives. Par exemple lorsque l'esthétique et la récupération des composants en fin de vie est mise en avant les alternatives avec des attachements solidaires sont préférées (annular snap-fit et cantilever snap-fit) aux alternatives avec des attachements discrets (vis et vis-écrou). Cette méthode présente des aspects intéressants cependant son domaine d'application est limité à cause du fait qu'elle se limite au désassemblage non destructif et donc certains types d'attachements sont mis à l'écart. Ils pourraient toutefois être des alternatives intéressantes si un désassemblage semi destructif était envisagé.

Ces deux méthodes sont des outils intéressants pour les concepteurs et peut leur fournir une aide précieuse lors de la phase de conception. Cependant aucunes des méthodes ne parvient à traiter le problème dans sa globalité. En effet, dans chacune d'elles la possibilité d'opérer un désassemblage semi-destructif n'est pas pris en compte. Pourtant cet aspect est primordial car il est rare qu'un produit soit complètement démonté sans endommagement et bien souvent l'objectif principal du recyclage va être de récupérer rapidement les pièces de valeurs. Pour cela, il ne sera pas exclu de détruire certains attachements ou de scier des pièces dont la valeur intacte est faible ou proche de celle de la revente en tant que matériau recyclé. L'étude qui va suivre vise donc à intégrer cet aspect dans une méthode de choix des attachements afin de rendre plus juste et plus réaliste le résultat.

2.5 Objectifs de la recherche

Le rôle principal des attachements dans un assemblage est premièrement de réaliser une liaison fiable entre les différentes pièces du produit. Cependant, leur rôle ne se limite pas seulement à cela, ils ont également un impact très important sur les caractéristiques du produit. En effet, le choix d'un type d'attachement influence des paramètres comme la résistance du produit, la facilité d'assemblage et de désassemblage, les fins de vie possibles pour les pièces...

En prenant en compte tous ces éléments le choix devient nettement plus complexe et il est alors difficile pour le concepteur de choisir le type d'attachement qui répondra au mieux aux exigences fixées. Pour l'aider dans sa démarche différentes méthodes ont vu le jour, mais bien souvent elles ne sont pas suffisamment complètes pour être applicables sur des cas concrets, ou ne prennent pas en compte tous les aspects du problème rencontré. Notre objectif consiste donc à mettre au point une méthode de choix plus complète tout en restant facilement utilisable. Cette méthode devra être à même de fournir au concepteur lors des phases de conception préliminaire la possibilité de comparer plusieurs alternatives d'attachements et de le guider vers la solution répondant au mieux aux exigences. Les résultats obtenus grâce à elle serviront de guide pour le concepteur. Le choix final est toujours entre les mains du concepteur, nous ne faisons que lui fournir une aide à la prise de décision en le guidant vers le meilleur compromis.

Le principal point d'amélioration concerne le désassemblage et plus précisément l'intégration du désassemblage semi destructif dans la détermination de la meilleure solution. Ce type de désassemblage est rarement abordé, voire jamais, bien qu'il présente de nombreux intérêts. Nous porterons une attention toute particulière à la flexibilité de la méthode. En effet, dans le but de pouvoir être applicable dans une majorité de cas, les données doivent être aisément modifiables.

Enfin, un point important concerne la rapidité d'utilisation de la méthode. Son utilisation se faisant principalement lors de la phase de conception préliminaire, toute perte de temps trop importante risque de pénaliser le développement du produit.

2.6 La démarche suivie

La démarche que nous avons suivie afin de parvenir à l'établissement de cette méthode de choix est la suivante :

- 1- Recherche de méthodes existantes traitant du choix des attachements ainsi que d'informations concernant les désassemblages non destructif et semi destructif.
- 2- Analyse de ces méthodes en détail afin de déterminer les domaines d'application, les limites et les différents paramètres pris en compte.

- 3- Choix de la méthode de calcul utilisée et des paramètres qui seront pris en compte dans notre méthode et recherche de diverses informations/outils permettant d'évaluer au mieux les paramètres choisis
- 4- Création de la méthode de choix en mettant en relation les paramètres et en attribuant une importance à chaque élément.
- 5- Test de la méthode sur un premier exemple simple afin de valider son fonctionnement et d'apporter les modifications nécessaires.
- 6- Test de la méthode sur différents exemples plus complexes.

CHAPITRE 3 DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODE

Dans ce chapitre, nous allons détailler le cheminement suivi pour développer la méthode présentée. Nous verrons tout d'abord les raisons qui nous ont conduites à opter pour la méthode ANP en expliquant son fonctionnement, son intérêt dans ce type de problème et ses limites. Puis nous détaillerons les paramètres qui ont été choisis pour représenter le problème ainsi que les différents choix et calculs annexes réalisés pour aboutir aux premiers résultats. Enfin, nous verrons en fin de ce chapitre, différents exemples permettant d'illustrer au mieux les possibilités de la méthode.

3.1 La méthode Analytic Network Process (ANP)

3.1.1 Le choix de cette méthode

Le choix d'un attachement est loin d'être un choix aisé dès l'instant que l'on cherche à optimiser ses performances sur l'ensemble de son cycle de vie. En effet, il doit non seulement répondre aux exigences en matière de résistance mécanique pour assurer la fiabilité du produit mais il doit également permettre un traitement du produit en fin de vie respectant au mieux l'environnement. Toutes ces exigences impliquent de nombreux paramètres afin de représenter le problème dans sa globalité. Plus le nombre de paramètres est important et plus il devient difficile de faire un choix. Ceci est particulièrement vrai dès lors que des paramètres de nature différente sont pris en compte. Comment déterminer l'importance entre un temps d'assemblage et un nombre d'attachements ? La meilleure solution dans un des aspects ne signifie pas forcément qu'elle est la meilleure solution. Tout est une affaire de compromis et par conséquent il est nécessaire d'être capable d'évaluer l'importance de chaque partie pour prendre une décision globale.

Différentes méthodes d'aide à la prise de décision ont donc vu le jour pour apporter une solution à ces problèmes complexes. La première que nous pouvons citer est la méthode Analytic Hierarchy Process (AHP) développée par Saaty (Saaty, 1996). Cette méthode est applicable dans toutes sortes de domaines allant de la technologie à la politique ou encore aux problèmes économiques et sociaux. Elle permet de représenter un problème et de classer plusieurs alternatives grâce à des comparaisons réalisées entre les différents paramètres représentant le

problème. Cependant cette méthode n'est pas adaptée à tous les cas. En effet, elle part du principe que tous les paramètres sont directement liés entre eux pour satisfaire l'objectif fixé, ce qui n'est pas forcément le cas. Des paramètres peuvent influencer le résultat final sans pour autant être en lien avec tous les autres paramètres. Dans cette situation il est nécessaire d'utiliser la méthode Analytic Network Process (ANP) qui est une variante de la méthode AHP et qui permet de représenter non plus le problème sous forme hiérarchique mais sous la forme d'un réseau avec différents groupes qui peuvent être liés.

Grâce à la méthode ANP, il va donc être possible de mettre en relation l'ensemble des paramètres définissant le problème rencontré. Puis, une fois que l'influence de chaque paramètre sur les éléments qui lui sont reliés va être déterminée, nous obtiendrons un résultat permettant de classer les différentes alternatives envisagées. L'alternative obtenant la valeur finale la plus élevée sera celle qui répondra au mieux à l'ensemble des exigences définies et donc celle qui correspond au meilleur compromis possible.

3.1.2 Le fonctionnement de la méthode ANP

3.1.2.1 Création du réseau

La première étape de la méthode ANP consiste tout d'abord à créer le réseau qui va permettre de représenter le problème envisagé. Pour cela il est nécessaire de déterminer tous les paramètres qui entrent en ligne de compte et les groupes auxquels ils appartiennent.

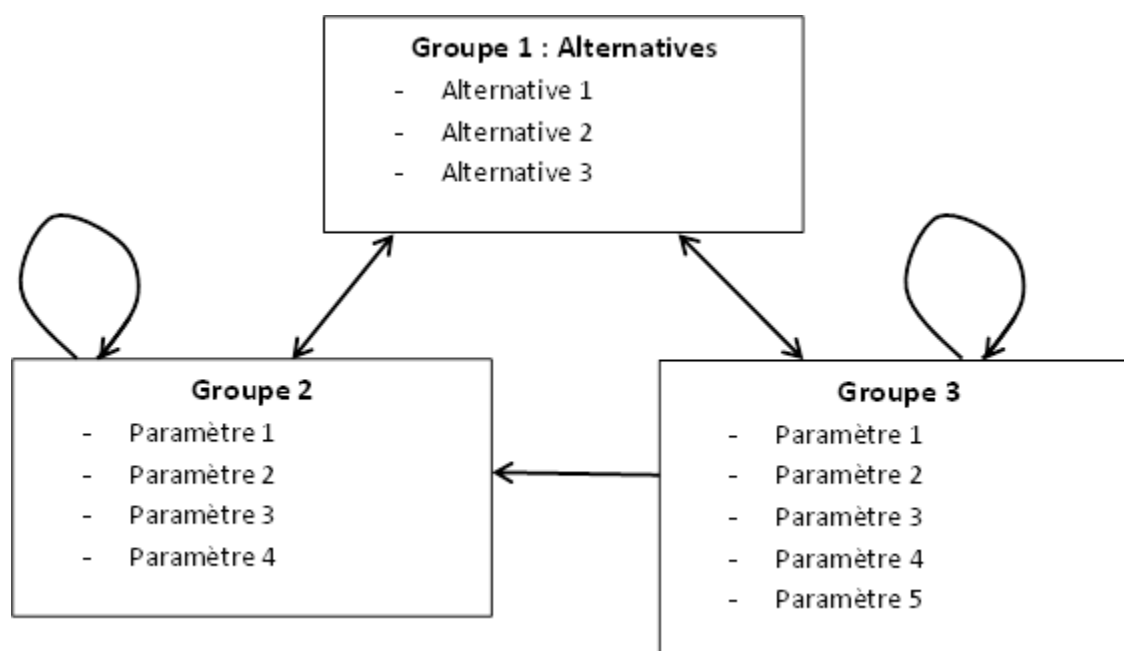


Figure 3.1: Exemple de réseau

Ensuite, les liens entre les groupes doivent être créés. Plus précisément cela consiste à voir si un groupe a une influence sur un autre groupe et inversement. La figure 3.1 illustre cela. Le groupe 1 contient les différentes alternatives, les groupes 2 et 3 sont des groupes contenant des paramètres permettant de définir le problème. 3 types de lien sont possibles. Une flèche signifie que les éléments du groupe pointé par la flèche ont une influence sur les éléments de l'autre groupe. Les doubles flèches signifient que les éléments des 2 groupes sont liés entre eux. La flèche en boucle permet de signaler que des éléments à l'intérieur du groupe sont liés entre eux.

Enfin, il reste à déterminer les liens entre les différents paramètres qui vont par la suite permettre de connaître les comparaisons à effectuer pour chaque paramètre. Ces liens sont représentés sous la forme d'une matrice de connexion comme celle donnée en exemple dans le tableau 3.1. La lecture se fait colonne par colonne. Par exemple dans la première colonne nous pouvons voir que P2 et P3 sont liés à P1 ce qui implique que P2 et P3 seront comparés entre eux avec comme critère P1. Autrement dit, lequel des 2 paramètres a le plus d'influence sur P1 et dans quelle mesure.

Tableau 3.1 : Exemple de matrice de comparaison

	P1	P2	P3	P4
P1	0	0	1	0
P2	1	0	1	1
P3	1	1	0	1
P4	0	1	1	0

3.1.2.2 Déterminer les influences

L'étape suivante consiste à déterminer les influences des groupes et des paramètres en fonction des exigences considérées et des choix réalisés lors de la création du réseau. Pour effectuer ces comparaisons, une échelle de valeur a été introduite dans la méthode ANP par Saaty. Cette échelle présentée dans le tableau 3.2 permet de représenter simplement le jugement de l'utilisateur et de donner plus ou moins d'influence à un paramètre. L'avantage de cette échelle est qu'elle ne demande pas de valeurs exactes pour être efficace, ce qui est particulièrement intéressant pour une utilisation dans les premières phases de conception ou tout n'est pas encore précisément défini.

Tableau 3.2 : Échelle de comparaison utilisée dans la méthode ANP

Intensité	Définition	Description
1	Egale importance	Deux éléments contribuent de façon similaire à l'objectif
2	Importance faible	
3	Importance modérée	L'expérience et le jugement privilégient un élément par rapport à un autre
4	Importance modérée +	
5	Importance forte	L'expérience et le jugement privilégient largement un élément par rapport à un autre
6	Importance forte +	
7	Importance très forte ou démontrée	Un élément est très largement privilégié ou sa prédominance est démontrée dans la pratique
8	Importance très forte +	
9	Importance maximale	Un des éléments est indéniablement plus important qu'un autre

Pour chaque groupe et paramètre une série de comparaisons est effectuée. Les valeurs choisies sont rentrées dans des matrices dites de comparaisons et grâce à elles nous allons

pouvoir calculer les influences de chacun. Ces calculs seront présentés plus en détails dans la partie suivante sur des exemples. Les comparaisons effectuées pour un paramètre peuvent conduire à un résultat incohérent, ce qui aurait pour conséquence de donner des résultats faussés. Pour éviter cela il est nécessaire de calculer le coefficient de cohérence de chaque matrice de comparaison. Lorsque celui-ci est supérieur à 0.1, alors la matrice est dite inconsistante et il est indispensable de modifier les comparaisons qui ont été faites (Saaty, 1996). Tous les résultats obtenus pour les influences des paramètres sont ensuite regroupés au sein d'une matrice globale appelée une supermatrice.

3.1.2.3 Calcul de la supermatrice limite et obtention des résultats

Les valeurs contenues dans la supermatrice doivent être coefficientées par les influences des groupes déterminées précédemment. Finalement cette supermatrice va être élevée à une grande puissance dans le but de la faire converger vers le résultat final (toutes les colonnes doivent être égales) et ainsi obtenir les préférences finales qui vont nous permettre de classer les différentes alternatives.

3.1.3 Limites de la méthode ANP

Cette méthode est un outil indispensable pour parvenir à un résultat concis prenant en compte tous les aspects du problème, cependant elle n'est pas parfaite sur tous les points. En effet, la mise en place de cette méthode est longue. Plus le nombre de paramètres pris en compte est important, plus le nombre de comparaisons sera important. Ceci peut être un problème dans le cas d'une utilisation lors des phases préliminaires de conception car chaque nouvelle alternative envisagée va impliquer de faire de nouvelles comparaisons et ainsi ralentir le développement du produit. De plus, la méthode ANP se base essentiellement sur des jugements qualitatifs, ce qui peut résulter dans des imprécisions dans certains cas et donc ne pas représenter assez fidèlement le problème.

3.2 Les paramètres pris en compte

3.2.1 Critères de choix

Comme cela a été présenté précédemment, l'objectif de la recherche est de mettre au point une méthode de choix d'attachement la plus complète possible sans pour autant devenir trop complexe afin de rendre son utilisation la plus facile possible lors des phases préliminaires de conception où le temps est un paramètre non négligeable. Les paramètres choisis doivent permettre de représenter les contraintes présentes en assemblage, lors de la phase d'utilisation ainsi que lors du désassemblage. Afin de ne pas rendre la méthode trop complexe à utiliser, il est nécessaire d'utiliser un nombre limité de paramètres sans pour autant perdre en précision. Enfin, étant donné que la méthode ANP repose principalement sur des jugements pour comparer les différents paramètres, il peut être intéressant de choisir des paramètres qui ne sont pas sujet à l'interprétation afin d'éviter des erreurs lors des comparaisons. Si chacun a un avis différent sur un paramètre il risque d'être compliqué de parvenir à un résultat convaincant. Il est préférable d'utiliser des paramètres quantitatifs comme des temps ou des masses qui sont facilement comparables et ne créent donc pas d'erreur de jugement. En résumé, voici les différents critères de choix à prendre en compte lors du choix des paramètres :

- Représenter toutes les phases du cycle de vie du produit
- Limiter le nombre de paramètres pour éviter de rendre la méthode trop complexe d'utilisation
- Choisir des paramètres qui ne sont pas sujet à interprétation

3.2.2 Sélection des paramètres

3.2.2.1 L'ensemble des paramètres pouvant permettre de définir l'assemblage

L'assemblage des produits est un sujet de mieux en mieux maîtrisé et dans ce domaine de nombreux progrès ont été effectués lors des dernières décennies afin de produire toujours plus vite et soutenir le développement économique. A partir de la littérature nous allons dresser une liste des principaux paramètres à prendre en compte lors de l'assemblage d'un produit et la

sélection de l'attachement pour lier les pièces ou sous-assemblages. Par la suite nous choisirons un certain nombre de ces paramètres. Plusieurs choix seront faits afin de se limiter au cadre de la recherche.

Les paramètres tirés des différents articles sont les suivants :

- **Temps d'assemblage** : C'est certainement un des paramètres qui a le plus d'influence lors du choix d'un attachement. En effet, les différents types d'attachements présentent tous des caractéristiques propres qui vont directement impacter le temps d'assemblage du produit et donc les coûts de fabrication. Ce paramètre est un très bon indicateur pour différencier les différents attachements car il est absolu et précis.
- **Outils** : Chaque attachement nécessite un outil spécifique pour pouvoir être mis en place et la complexité de l'outil joue un rôle dans le choix des attachements. En effet, plus l'outil sera complexe plus les coûts seront importants du fait de l'outil lui-même, mais également à cause du fait qu'il impliquera certainement des installations et des formations spécifiques. Dans le cas d'un assemblage manuel il est bien évident que si un attachement ne requiert aucun outil (main uniquement) pour être mis en place, il sera privilégié par rapport à un attachement nécessitant un outillage spécifique.
- **Nombre d'attachements** : L'assemblage de deux composants est généralement réalisé à l'aide de plusieurs attachements qui peuvent eux même être composés de plusieurs pièces (cas des attachements de type vis/écrou par exemple). Il est très souvent préconisé de limiter le nombre de pièces dans un assemblage afin d'en réduire la complexité tout en réduisant également le temps d'assemblage du fait que moins de pièces ont besoin d'être manipulées.
- **Espace nécessaire** : Chaque type d'attachement requiert un volume plus ou moins important. Étant donné que les attachements sont des composants qui n'entre pas en compte dans la réalisation de la fonction du produit, il est intéressant de minimiser le

volume occupé par les attachements afin de garder un espace plus important pour les composants fonctionnels.

- **Complexité du design** : Selon l'attachement choisi, le design de la pièce peut être fondamentalement différent. Plus celui-ci sera complexe et plus la fabrication le sera, tout comme, l'assemblage. La fiabilité du produit peut également être impactée.
- **Nombres d'étapes nécessaires** : Ce paramètre est tout comme le nombre d'attachement un point important car il va directement influencer la complexité de la ligne d'assemblage. En plus des étapes de mise en position des pièces et des attachements, les étapes de préparation sont prises en compte car elles peuvent varier d'un attachement à un autre.
- **Direction d'accès** : Autant en assemblage manuel, qu'en assemblage automatisé, la direction d'accès joue un rôle important. En effet, certains axes pour accéder à la zone de travail sont bien plus intéressants que d'autres. Il est nettement plus aisé de fixer une pièce lorsque l'accès se fait de haut en bas. Certaines directions d'accès requièrent des mouvements complexes et donc souvent des outils spécifiques ce qui n'est pas à privilégier si on espère obtenir un produit facile à assembler.
- **Complexité du mouvement d'assemblage** : Tout comme la direction d'accès, la complexité du mouvement joue un rôle important. En ce qui concerne l'assemblage manuel, des mouvements de type « poussée » sont plus simples que des mouvements de torsions. Il en est de même en assemblage automatisé où les machines utilisées seront plus ou moins complexe selon le mouvement à opérer.
- **Probabilité de casse** : Lors de l'assemblage, un endommagement des attachements ou des composants assemblés est possible. Cela implique de prendre un nouvel attachement ou une nouvelle pièce (ou la réparer suivant l'importance et les dégâts). Outre le fait

d'augmenter le coût à cause du changement ou de la réparation, le temps d'assemblage est également impacté ce qui va encore d'avantage augmenter les coûts.

- **Coût des modifications** : Un mauvais choix d'attachement peut être fait durant la phase de conception et lorsque l'on souhaite modifier l'attachement utilisé cela va entraîner des coûts supplémentaires à cause du fait que le design de la pièce va être modifié. Certains attachements présentent une certaine flexibilité car ils ne requièrent pas un design spécifique. Par conséquent, ces attachements seront plus intéressants sur ce point.
- **Difficultés à réaliser des prototypes** : Il n'est pas rare de réaliser plusieurs prototypes du produit afin de le tester et de détecter d'éventuelles anomalies. Si l'attachement choisi permet de réaliser rapidement ces prototypes cela sera très intéressant afin de minimiser le temps passé à tester le produit et donc le temps de conception.
- **Possibilité d'automatiser l'assemblage** : Du fait des cadences de production élevées que les fabricants doivent tenir, l'assemblage automatisé est souvent une très bonne option. Le choix des attachements peut être impacté selon la manière dont sera réalisé l'assemblage.
- **Dimensions et formes des pièces** : Suivant la dimension d'un attachement, celui-ci sera plus ou moins difficile à saisir et à mettre en place. La forme joue un rôle similaire, en effet certaines formes rendent les pièces difficiles à saisir.
- **Qualification des ouvriers** : Certains attachements nécessitent que les ouvriers aient suivi une formation spécifique ou soient qualifiés pour utiliser les outils nécessaires à l'assemblage.
- **Équipement requis** : Outre les outils, des équipements peuvent être requis lors de l'utilisation de certains attachements comme des gants, des masques ou encore des combinaisons.

- **Coût des attachements** : Tous les attachements ont un coût d'achat différent et plus la quantité de produits est importante plus ce paramètre peut avoir de l'influence. Un attachement avec un faible coût sera toujours plus intéressant. Les économies peuvent être importantes pour les produits de grandes séries.
- **Coût de préparation** : Suivant l'attachement sélectionné, des préparations spécifiques doivent être effectuées en amont de l'assemblage.

Tableau 3.3 : Les paramètres influençant l'assemblage et les références correspondantes

Paramètres	Sources
Temps d'assemblage	Boothroyd, 1986; Das, Yedlarajiah & Narendra, 2000; Ghazilla, Taha, Yusoff, Rashid & Sakundarini, 2014
Outils	Boothroyd, 1986; Das, Yedlarajiah & Narendra, 2000; Güngör, 2006; Sonnenberge, 2001
Nombre d'attachements	Boothroyd, 1986; Chen, Navin-Chandra & Prinz, 1993; Güngör, 2006; Sonnenberge, 2001; Rose, Ishii & Masui, 1998
Espace nécessaire	Güngör, 2006
Complexité du design	Boothroyd, 1986; Chen, Navin-Chandra & Prinz, 1993; Güngör, 2006
Nombres d'étapes nécessaires	Güngör, 2006; Sonnenberge, 2001; Rose, Ishii & Masui, 1998
Direction d'accès	Boothroyd, 1986; Das, Yedlarajiah & Narendra, 2000;
Complexité du mouvement d'assemblage	Güngör, 2006; Sonnenberge, 2001
Probabilité de casse	Güngör, 2006; Sonnenberge, 2001
Coûts des modifications	Güngör, 2006; Sonnenberge, 2001
Difficultés à réaliser des prototypes	Güngör, 2006; Sonnenberge, 2001
Possibilité d'automatiser l'assemblage	Ghazilla, Taha, Yusoff, Rashid & Sakundarini, 2014; Güngör, 2006; Sonnenberge, 2001
Dimensions et formes des pièces	Boothroyd, 1986;
Qualification des ouvriers	Das, Yedlarajiah & Narendra, 2000
Équipement requis	Das, Yedlarajiah & Narendra, 2000
Coût des attachements	Ghazilla, Taha, Yusoff, Rashid & Sakundarini, 2014
Coût de préparation	Ghazilla, Taha, Yusoff, Rashid & Sakundarini, 2014

3.2.2.2 Choix des paramètres pour la phase assemblage

Les paramètres pouvant représenter les contraintes de la phase de d'assemblage cités précédemment sont trop nombreux pour pouvoir tous être pris en compte sous cette forme dans la méthode ANP. Cependant nous pouvons remarquer que certains paramètres sont en lien direct avec d'autres. Autrement dit, un paramètre peut permettre d'en représenter plusieurs autres. Le nombre va ainsi pouvoir être réduit sans pour autant perdre en précision. C'est le cas du temps

d'assemblage. En effet, ce paramètre est un excellent indicateur et lorsque l'on cherche à le calculer avec des méthodes telles que celle développée par Boothroyd (Boothroyd, 1986), nous pouvons nous rendre compte que certains des paramètres cités précédemment sont utilisés. Les dimensions ainsi que les formes des pièces sont les premiers aspects pris en compte. Les symétries jouent un rôle important dans la manipulation des pièces, ainsi que les dimensions qui vont rendre une pièce plus ou moins difficile à saisir et donc influencer directement le temps de désassemblage. L'agencement des pièces est également considéré et cette méthode permet d'ailleurs de mettre en avant les faiblesses du design d'une pièce. De plus, le temps estimé de fixation d'une pièce sur une autre prend en compte le type de fixation (vissé, soudé, emboîté...), par conséquent nous pouvons affirmer que la complexité du mouvement est prise en considération. Ainsi, en ne tenant compte que du temps d'assemblage nous sommes capables de limiter le nombre de paramètre en supprimant :

- Complexité du mouvement d'assemblage
- Dimensions et formes des pièces
- Complexité du design

Ensuite, nous pouvons effectuer une opération similaire en ce qui concerne la possibilité d'automatiser le désassemblage. En effet, ce paramètre peut être mis de côté car la combinaison de plusieurs autres paramètres va permettre de le prendre en compte. L'automatisation de l'assemblage va essentiellement impacter sur le temps d'assemblage, les outils nécessaires ainsi que la qualification des ouvriers. En jouant sur ces trois paramètres nous allons pouvoir considérer l'influence de l'automatisation de l'assemblage.

En ce qui concerne les coûts relatifs aux attachements et aux phases de préparation, nous ne les prendrons pas en compte dans cette méthode. Nous cherchons principalement à fournir une méthode répondant aux problèmes techniques que peut rencontrer un concepteur lors d'une phase de conception et lui permettre d'être guidé vers le choix de l'attachement répondant au mieux à ses exigences et dans l'optique d'une fin de vie écoresponsable. Cela implique que le choix de l'attachement ne doit pas nécessairement se faire en considérant uniquement l'aspect économique. Un attachement présentant un bilan économique très intéressant ne sera pas forcément intéressant sur le plan environnemental.

Nous avons déjà pu réduire le nombre de paramètres à prendre en compte cependant ils sont toujours trop nombreux et la suppression de l'un d'eux entrainerait une perte d'information. La solution qui a été choisie pour palier à ce problème est de regrouper certains paramètres au sein d'un paramètre plus global. Ce nouveau paramètre est calculer au préalable, en dehors de la méthode ANP, et le résultat est ensuite utilisé dans cette dernière. Le nouveau paramètre global que nous avons créé est la complexité de l'assemblage et permet de refléter les difficultés relatives à l'assemblage de plusieurs composants. Il regroupe les cinq paramètres suivants :

- Temps d'assemblage
- Outils
- Direction d'accès
- Qualification des ouvriers
- Équipement requis

Ces paramètres ont été choisis car ils sont aisément quantifiables et à eux cinq ils représentent bien les contraintes lors de l'assemblage. Nous verrons par la suite de quelle manière est calculée cette complexité d'assemblage.

Au final, les paramètres contenus directement dans la méthode ANP pour la phase assemblage sont au nombre de sept dont un (complexité d'assemblage), contenant cinq autres paramètres, qui est calculé séparément. Ces paramètres sont les suivants :

- Nombre d'éléments d'attachements
- Espace nécessaire
- Nombre d'étapes nécessaires
- Probabilité de casse
- Coût des modifications
- Difficultés à réaliser des prototypes
- Complexité d'assemblage

3.2.2.3 Les paramètres pouvant représenter la phase d'utilisation du produit

La seconde grande phase de vie du produit correspond à son utilisation jusqu'à ce qu'il ne réponde plus aux exigences, qu'il se détériore ou bien qu'un nouveau produit vienne le

remplacer. Le produit doit satisfaire les exigences de l'utilisateur en matière de fiabilité, d'apparence et de fonctionnalité. Les paramètres influençant le choix des attachements pouvant représenter cela sont les suivants :

- **Fiabilité des attachements** : Le produit se doit d'être suffisamment fiable pour offrir une qualité suffisante et supporter au mieux les contraintes lors de son utilisation. Les attachements jouent un rôle important car ils maintiennent les différents composants fonctionnels et bien souvent la détérioration d'un attachement entraîne une perte de fonctionnalité du produit voire une défaillance. Sélectionner un attachement qui fait preuve d'une bonne fiabilité est donc un gage de sécurité.

- **Capacité à supporter différents environnements** : Lors de sa phase d'utilisation un produit est susceptible d'être soumis à divers environnements présentant des conditions qui peuvent être néfastes à l'intégrité des attachements. Il peut en résulter des défaillances ou cela peut également poser de nombreux problèmes lors du désassemblage du produit. En effet, nous pouvons prendre l'exemple de vis corrodées qui vont être nettement plus difficiles à dévisser que des vis en bon état.

- **Effets sur l'apparence** : L'apparence d'un produit est un aspect important autant sur le plan commercial qu'environnemental. En effet, un produit dont l'apparence est soignée est plus attractif pour le consommateur mais celui-ci aura également tendance à le conserver plus longtemps si le produit lui plaît. Le remplacement d'un produit par un autre avec une meilleure apparence est fréquent. Ainsi, concevoir un produit qui saura rester attractif aura pour effet de limiter les produits mis au rebut. Les attachements ont leur part à jouer dans ce domaine et le choix doit tenir compte de cet aspect.

- **Propriétés mécaniques** : Chaque attachement confère au produit une certaine résistance mécanique, ou modifie ses caractéristiques en matière de conductivité électrique et thermique ou encore ils peuvent servir à filtrer les vibrations en jouant le rôle

d'amortisseur. Il est indispensable de tenir compte de cela pour que le produit supporte les contraintes et satisfasse les exigences.

Tableau 3.4 : Les paramètres influençant la phase d'utilisation et les références correspondantes

Paramètres	Sources
Fiabilité des attachements	Güngör, 2006; Ghazilla, Taha, Yusoff, Rashid & Sakundarini, 2014; Sonnenberge, 2001
Capacité à supporter différents environnements	Güngör, 2006
Effets sur l'apparence	Güngör, 2006; Ghazilla, Taha, Yusoff, Rashid & Sakundarini, 2014
Propriétés mécaniques	Ghazilla, Taha, Yusoff, Rashid & Sakundarini, 2014

3.2.2.4 Choix des paramètres pour la phase utilisation du produit

Parmi les quatre paramètres cités dans la partie précédente, nous ne considérerons pas les propriétés mécaniques de l'attachement. En effet, nous partons du postulat que le concepteur a déterminé plusieurs alternatives viables avant d'utiliser cette méthode. Il est donc de son ressort de déterminer quels attachements sont susceptibles de répondre aux exigences mécaniques. Les paramètres retenus sont donc :

- Fiabilité des attachements
- Capacité à supporter différents environnements
- Effets sur l'apparence

3.2.2.5 Les paramètres susceptibles de représenter les contraintes du désassemblage

Une fois la fin de vie du produit atteinte, différentes fins de vie sont possibles allant de la mise en décharge jusqu'à la remise en état et la réutilisation du produit. Il est bien souvent nécessaire de désassembler le produit afin de séparer les différents éléments qui ont encore de la valeur ou qui peuvent être réutilisés. Suivant les choix qui ont été faits, le produit peut être désassemblé complètement ou partiellement afin de ne récupérer que les pièces qui présentent le plus d'intérêt. Différentes techniques de désassemblage sont également possibles. Dans le meilleur des cas, le produit peut être désassemblé sans endommager les pièces en retirant les attachements. Mais bien souvent cela est trop fastidieux pour être mis en place. Il est alors possible de se tourner vers des techniques de désassemblage dites semi-destructives. Cela

correspond au fait de détériorer une ou plusieurs pièces d'un assemblage afin de récupérer les pièces ou les matériaux les plus intéressants. Le gain de temps est très important sans pour autant engendrer une perte importante de valeur. Nous ne considérerons pas les techniques consistant à broyer le produit pour ensuite trier les différents matériaux car les attachements ont bien moins d'impact dans cette situation. En effet, le problème réside essentiellement dans le fait de parvenir à trier les différents matériaux et non à séparer les différentes pièces. Grâce à la littérature nous allons dresser une liste des paramètres permettant de représenter au mieux toutes les facettes du désassemblage. La liste est la suivante :

- **Temps de désassemblage** : Un des paramètres les plus importants car il est directement relié au coût de désassemblage et donc bien évidemment à la rentabilité des opérations de désassemblage. Un assemblage trop long à désassembler sera nettement moins intéressant et le désassemblage pourrait ne pas être effectué si ce-dernier est vraiment trop important.
- **Outils** : Suivant l'attachement choisi pour réaliser un assemblage, l'outil pour opérer le désassemblage sera spécifique et plus ou moins perfectionné. Le choix d'un désassemblage non-destructif ou semi-destructif influence également l'outil utilisé. Certains attachements nécessitent des outils spéciaux qui ont un coût nettement plus élevé qu'un simple tournevis et peuvent demander des formations pour être utilisés. D'autres problèmes rencontrés lors du désassemblage concernent la diversité des attachements et le possible endommagement de ceux-ci. Pour solutionner ces problèmes, des études sont faites sur des outils flexibles (Duflou, Seliger, Kara, Umeda, Ometto & Willems, 2008) facilitant le désassemblage de tous types d'attachements ou encore des outils spécifiques permettant de briser la tête des vis afin de libérer facilement les pièces même si l'attachement est endommagé (Pak & Sodhi, 2002).
- **Force requise** : Plus la force nécessaire pour défaire un attachement est importante et plus les risques pour l'opérateur seront importants ou plus le système devra être robuste dans le cas d'un désassemblage automatisé.

- **Direction d'accès :** Un attachement peut être facilement démontable mais s'il n'est pas ou difficilement accessible, le temps de désassemblage va fortement être augmenté. Contrairement à l'assemblage durant lequel les pièces sont assemblées les unes après les autres, lors du désassemblage il n'est pas rare de s'intéresser à une pièce spécifique et les attachements servant à sa fixation ne sont pas nécessairement accessibles et il sera alors difficile de positionner l'outil pour opérer le désassemblage.
- **Complexité du mouvement de désassemblage :** Tout comme pour les opérations d'assemblage, le geste à effectuer pour défaire un attachement influence la facilité du désassemblage, le type de machine à utiliser.
- **Facilité de revente des pièces :** Ce paramètre regroupe tous les problèmes qui peuvent être rencontrés suite au démontage d'une pièce ou d'un sous-assemblage. Dans certains cas comme l'aéronautique, les pièces doivent être recertifiées avant de pouvoir être réutilisées dans un nouveau produit. Des réparations ou des opérations d'usinage peuvent être nécessaires. Les attachements assurant un désassemblage sans dommages sur les pièces seront généralement plus intéressants à utiliser.
- **Possibilité d'automatiser le désassemblage :** L'automatisation de l'assemblage des produits a permis des gains importants de temps, des diminutions de coûts... Il peut en être de même en désassemblage même si d'autres problèmes se posent. En effet, la diversité des pièces à désassembler impose l'utilisation de lignes flexibles capables de s'adapter à tous les designs. Cependant si nous prenons pour exemple les appareils photos jetables (Duflou, Seliger, Kara, Umeda, Ometto & Willems, 2008), la ligne de désassemblage qui a été mise au point permet des gains importants et met bien en avant le fait que le désassemblage est loin d'être seulement une contrainte supplémentaire.
- **Possibilité de réaliser un désassemblage non-destructif :** Le choix de tel ou tel attachement lors de la phase de conception va directement influencer la possibilité

d'opérer ou non un désassemblage non-destructif. Ceci est très important dans le cas où la pièce ou le sous-assemblage doit être réutilisé.

- **Risque de dégradation :** Lors du désassemblage il est possible que les pièces soient endommagées. Si ces pièces doivent être réutilisées il sera préférable d'opter pour des attachements assurant un démontage avec le moins de risques d'endommagement possibles.
- **Qualification des ouvriers :** La qualification des ouvriers comprend non seulement les éventuelles formations nécessaires pour utiliser un outil ou une machine mais également le temps nécessaires pour prendre connaissance des informations relatives au produit qui va être désassemblé.
- **Équipement requis :** Suivant le produit désassemblé, les outils utilisés... différents équipements peuvent être requis. Dans la majeure partie des cas des gants suffisent, cependant si le produit contient des matières toxiques ou si des opérations de sciage sont effectuées d'autres protections sont nécessaires pour garantir la sécurité des opérateurs.
- **Type de fixation des pièces :** Pour effectuer les opérations de désassemblage il est parfois nécessaire de fixer les pièces. Ce paramètre est utilisé pour représenter les différentes situations possibles.
- **Identification des attachements :** Un des points qui pose le plus de problème lors du désassemblage est la capacité à identifier l'attachement utilisé pour réaliser une liaison. En effet, si nous prenons pour exemple les attachements solidaires, ils sont généralement masqués et difficiles à repérer, le temps de désassemblage va forcément en pâtir et les pièces risquent d'être endommagées à cause d'une mauvaise identification et donc d'un démontage inadéquat. Certains produits possèdent des marquages afin de préciser la position des attachements et ainsi faciliter le travail des opérateurs lors du désassemblage.

- **Résistance des matériaux :** Ce paramètre est particulièrement important pour le désassemblage semi-destructif. En effet, plus le matériau est résistant et plus le nombre de problèmes rencontrés sera conséquent, temps plus importants, efforts élevés, outils spécifiques, etc.

Tableau 3.5 : Les paramètres influençant le désassemblage et les références correspondantes

Paramètres	Sources
Temps de désassemblage	Das, Yedlarajiah & Narendra, 2000; Ghazilla, Taha, Yusoff, Rashid & Sakundarini, 2014; Güngör, 2006; Kroll & Carver, 1999; Rose, Ishii & Masui, 1998
Outils	Chen, Navin-Chandra & Prinz, 1993; Güngör, 2006; Kroll & Carver, 1999; Sonnenberge, 2001
Force requise	Das, Yedlarajiah & Narendra, 2000; Kroll & Carver, 1999; Sonnenberge, 2001
Direction d'accès	Das, Yedlarajiah & Narendra, 2000; Das, Yedlarajiah & Narendra, 2000; Kroll & Carver, 1999; Rose, Ishii & Masui, 1998
Complexité du mouvement de désassemblage	Güngör, 2006; Sonnenberge, 2001
Facilité de revente des pièces	Chen, Navin-Chandra & Prinz, 1993; Ghazilla, Taha, Yusoff, Rashid & Sakundarini, 2014; Güngör, 2006;
Possibilité d'automatiser le désassemblage	Ghazilla, Taha, Yusoff, Rashid & Sakundarini, 2014; Güngör, 2006
Possibilité de réaliser un désassemblage non-destructif	Güngör, 2006; Sonnenberge, 2001
Risque de dégradation	Ghazilla, Taha, Yusoff, Rashid & Sakundarini, 2014; Güngör, 2006; Sonnenberge, 2001
Qualification des ouvriers	Das, Yedlarajiah & Narendra, 2000;
Équipement requis	Das, Yedlarajiah & Narendra, 2000;
Type de fixation des pièces	Das, Yedlarajiah & Narendra, 2000;
Identification des attachements	Chen, Navin-Chandra & Prinz, 1993;
Résistance des matériaux	Sonnenberge, 2001

3.2.2.6 Choix des paramètres pour la phase désassemblage

Dans la partie précédente nous avons déterminé 14 paramètres susceptibles de représenter au mieux l'ensemble des problèmes rencontrés lors de cette dernière phase de la vie des produits. Ce qui est trop important pour être implémenté directement dans la méthode ANP. Nous allons suivre la même démarche que pour la phase d'assemblage afin de réduire le nombre de paramètres.

Tout d'abord, nous ne prendrons pas en compte le paramètre relatif à l'identification des attachements. En effet, nous supposons que le produit a été conçu avec pour objectif d'être

désassemblé et que par conséquent les bons choix de design ont été faits afin de faciliter l'identification des attachements (facilement visibles, marquages si nécessaire...).

Tout comme pour la phase assemblage nous allons utiliser la même technique pour créer un paramètre global en regroupant plusieurs autres. Ce paramètre est nommé la complexité de désassemblage et est calculé en dehors de la méthode ANP. Ensuite, étant donné que plusieurs méthodes de désassemblage sont possibles (désassemblage non-destructif ou semi-destructif) nous allons distinguer des cas différents au sein de la complexité de désassemblage avec pour chacun des paramètres spécifiques. Dans le cas d'un désassemblage non-destructif, les paramètres suivants sont pris en compte :

- Force requise
- Outils
- Direction d'accès
- Type de fixation
- Temps de désassemblage
- Qualification des ouvriers
- Équipement requis

En ce qui concerne le désassemblage semi-destructif, les paramètres suivants seront pris en compte :

- Résistance des matériaux
- Outils
- Accessibilité
- Type de fixation
- Temps de désassemblage
- Qualification des ouvriers
- Équipement requis

Enfin nous ne prendrons pas en compte le paramètre possibilité d'effectuer un désassemblage non-destructif car il est déjà intégré au problème grâce aux deux cas précédents.

En plus de la complexité de désassemblage, trois autres paramètres généraux s'appliquant à tous les cas seront intégrés dans la méthode ANP, à savoir :

- Facilité de revente des pièces
- Possibilité d'automatiser le désassemblage
- Risque de dégradation

Tous les paramètres ont été choisis, nous allons dans la partie suivante nous intéresser à l'exploitation de ces paramètres avec entre autres le calcul des complexités d'assemblage et de désassemblage et l'intégration de tous les paramètres dans la méthode ANP.

3.3 Calculs des complexités d'assemblage et de désassemblage

3.3.1 La méthode utilisée

Le calcul des complexités repose sur une méthode d'échelle de valeurs pour chacun des paramètres qui conduit ensuite à un score représentant la difficulté plus ou moins grande à réaliser l'assemblage ou le désassemblage. L'intérêt de ces échelles de valeurs est de pouvoir convertir un paramètre non numérique en une valeur numérique utilisable. Cette méthode a par exemple été utilisée par l'équipe de Das (Das, Yedlarajia & Narendra, 2000) dans le but de déterminer le coût du désassemblage ou encore par l'équipe de Tseng (Tseng, Chang & Li, 2007) qui a utilisé cette méthode pour déterminer l'intensité d'une liaison pour ensuite l'utiliser afin de d'optimiser la modularisation des assemblages. Chaque alternative possible prise en compte dans la méthode ANP recevra un score qui reflète ses caractéristiques et qui sera utilisé dans la méthode ANP pour obtenir le classement final.

Nous allons voir par la suite le détail des échelles pour tous les paramètres que nous avons précédemment choisis puis nous verrons l'importance donnée à chacun (pondération), et nous terminerons cette partie par un exemple d'application.

3.3.2 Les paramètres de la complexité d'assemblage

Pour chacun des cinq paramètres permettant de calculer la complexité d'assemblage, une échelle de valeur a été créée. Les différentes valeurs permettent de représenter les principales

possibilités et de les classer de la plus intéressante à la plus contraignante. Nous allons voir en détail ces échelles et décrire chacune des valeurs. Pour choisir ces échelles de valeurs nous nous sommes principalement appuyés sur trois articles (Das, Yedlarajia & Narendra, 2000; Tseng, Chang & Li, 2007; Kroll, Carver, 1999). Les différentes échelles proposées dans ces articles sont générales et permettent de traiter la plupart des cas. Il est possible de modifier ces échelles si nous voulons affiner les calculs. Les valeurs les plus élevées des échelles peuvent ne pas être pertinentes car elles ne sont pas rencontrées dans certains cas d'applications. Alors, il peut être intéressant de les remplacer par des valeurs plus représentatives et ainsi de mieux prendre en considération les spécificités du cas étudié. Cela est particulièrement vrai pour le paramètre Outils. En effet, l'échelle générale proposée est très vaste, allant de aucun outil nécessaire jusqu'à de gros outillages comme des presses.

Outils

- 1- Aucun :** L'assemblage est effectué à la main.
- 2- Pistolet pneumatique :** L'utilisation d'un pistolet pneumatique est requise. Un des outils les plus utilisés en assemblage manuel qui permet de faciliter le travail des opérateurs pour toutes les opérations de vissage.
- 3- Petit outils :** Des outils simples sont nécessaires, tels que pinces, tournevis, marteaux...
- 4- Outils spéciaux :** Certains attachements à cause de leur forme ou de leur emplacement nécessitent des outils spéciaux pour être mis en place.
- 5- Gros outillages :** Cette catégorie contient des outils tels que des presses ou des postes à souder.

Plus l'outil est dans une catégorie avec un chiffre élevé et plus il sera coûteux ou difficile d'utilisation et recevra donc un score important qui le pénalisera. L'idéal étant de pouvoir assembler sans outil.

Direction d'accès

- 1- **Par-dessus** : Pouvoir démonter un produit par le dessus est le plus ergonomique pour un opérateur, mais également pour un poste automatique comme le dessus est généralement dégagé.
- 2- **Sur les côtés** : L'accès aux attachements se fait sur les côtés du produit
- 3- **Plus de 15cm de profondeur**: L'attachement est situé à l'intérieur du produit à plus de 15cm de la surface. La visibilité est réduite et la manipulation est plus difficile.
- 4- **Par-dessous** : L'accès à l'attachement est plus compliqué et moins ergonomique car l'opérateur doit pouvoir se placer sous le produit.
- 5- **Axes combinés** : Le design du produit impose une direction d'accès complexe.
- 6- **Sans visibilité** : L'attachement est complètement masqué.

Temps d'assemblage

Le temps d'assemblage est un cas différent car il se présente déjà numériquement et de plus il est susceptible de varier significativement d'un assemblage à un autre. Pour chaque cas il va donc être nécessaire de déterminer une échelle linéaire encadrant au mieux les temps d'assemblage des différentes alternatives. Pour les exemples qui seront présentés dans la suite du mémoire, la méthode de Boothroyd (Boothroyd, 1986) a servi de base au calcul des temps d'assemblage. Les temps d'assemblage calculés par la suite comprennent la manipulation, l'insertion et la fixation des différentes pièces et attachements de l'assemblage.

Qualification des ouvriers

- 1- **Aucune** : Les opérations à effectuer sont évidentes et ne demandent aucune connaissance particulière.
- 2- **10 à 20 secondes** : Un certain temps est nécessaire à l'opérateur pour prendre connaissance des caractéristiques du produit à assembler.

- 3- **Plus de 30 secondes** : Comme pour l'étape précédente, l'opérateur doit préalablement prendre un certain temps pour consulter des bases de données, des plans ou des manuels...
- 4- **Discussion** : La complexité du produit impose aux opérateurs d'échanger entre eux afin de déterminer les opérations à effectuer.
- 5- **Formation** : Les opérations à effectuer sont complexes et nécessitent une formation spécifique des opérateurs.

Équipement requis

- 1- **Aucun** : Aucun équipement n'est requis pour effectuer les opérations d'assemblage.
- 2- **Gants** : L'opérateur doit être équipé de gants afin d'être protégé des objets tranchants et des éventuelles matières dangereuses.
- 3- **Masques** : En plus des équipements déjà cités, un masque et/ou d'autres protections corporelles sont indispensables.
- 4- **Protection anti-feu** : La présence de matières inflammables et/ou explosives impose que l'opérateur porte un équipement spécifique.
- 5- **Filtration de l'air** : Le produit doit être assemblé dans une atmosphère particulière qui requiert un système de filtration de l'air. C'est le cas par exemple pour les composants électroniques.
- 6- **Combinaison intégrale** : L'opérateur doit être intégralement couvert afin d'être protégé des conditions particulières. Ce cas est plus rare mais peut être rencontré dans des domaines militaires avec la manipulation de matières radioactives ou si des matières dangereuses sont présentes dans l'atmosphère de travail.

3.3.3 Les pondérations choisies pour les paramètres d'assemblage

Afin de déterminer une pondération pour les paramètres cités précédemment nous avons étudiés différentes méthodes traitant du sujet afin de voir quels paramètres sont les plus influents (Das, Yedlarajia & Narendra, 2000; Tseng, Chang & Li, 2007; Güngör, 2006). Pondérer les paramètres correspond à donner plus ou moins d'importance à un paramètre suivant son

importance. La somme des pondérations de chaque paramètre est égale à 100. Les différentes alternatives seront donc classées sur une échelle de 0 à 100 et plus le score sera élevé, plus l'assemblage sera considéré comme complexe.

Nous avons fait le choix d'utiliser une échelle linéaire pour attribuer les bonnes pondérations aux différentes possibilités de chaque paramètre. Par exemple si l'on suppose que le paramètre « Direction d'accès » reçoit une pondération de 30. Alors étant donné que nous avons déterminé 6 possibilités, la sixième recevra la pondération maximale (30), puis en diminuant la cinquième recevra $5/6$ de la pondération maximale, soit 25 et ainsi de suite. Pour certains paramètres l'utilisation d'une autre échelle pourrait être intéressante. En effet, si par exemple nous utilisons une échelle exponentielle cela permettrait de marquer d'avantage les différences entre chacune des possibilités. Ainsi, si nous prenons pour exemple le paramètre « Outils », une échelle exponentielle permettrait de marquer plus significativement la différence entre la première possibilité « Aucun outil » et des outils perfectionnés bien plus coûteux. Cependant il reste difficile d'évaluer précisément les différences et donc d'appliquer les bons coefficients à une échelle non linéaire.

Les pondérations appliquées aux 5 paramètres sont les suivantes :

Tableau 3.6 : Pondérations des paramètres assemblage

Outils	20
Direction d'accès	25
Temps d'assemblage	35
Qualification des ouvriers	10
Equipement requis	10

L'importance la plus grande a été donnée au temps d'assemblage car c'est un paramètre fondamental à prendre en compte qui impacte directement la productivité et les coûts d'assemblage. Les outils nécessaires et la direction d'accès jouent également un rôle important dans la complexité d'assemblage car des outils complexes et certaines directions d'accès peuvent être très contraignants et limiter l'intérêt de l'utilisation d'un type d'attachement au profit d'un autre. Enfin la qualification des ouvriers et les équipements requis ont reçu des pondérations

moins importantes car ces deux paramètres ont moins de conséquences sur la difficulté d'assemblage et les coûts associés en comparaison des autres paramètres.

3.3.4 Exemple d'application

Dans cette partie nous allons traiter un exemple théorique d'assemblage afin de présenter plus concrètement l'utilisation de la complexité d'assemblage. Nous prendrons pour exemple l'assemblage de 2 pièces quelconques de trois manières différentes. Les trois alternatives envisagées sont un assemblage vissé, un emboîtement (attachement solidaire), et un assemblage soudé. Les détails pour chacune des alternatives sont les suivants :

Alternative 1 : Assemblage vissé

Dans cette solution, les pièces sont assemblées à l'aide d'un pistolet pneumatique. L'assemblage ne requiert aucune compétences ou formation particulières, le port de gants est suffisant pour assurer la sécurité de l'opérateur. Enfin, le temps d'assemblage est assez long à cause du nombre de vis. Pour résumer les données à prendre en compte sont les suivantes :

- Outil : Pistolet pneumatique (2)
- Direction d'accès : Par-dessus (2)
- Temps d'assemblage : 45 secondes (4,5)
- Qualification des ouvriers : Aucune (1)
- Équipement requis : Gants (2)

Alternative 2 : Emboîtement

Pour cette alternative utilisant des attachements solidaires le temps d'assemblage est nettement inférieur car il y a très peu de manipulation à effectuer. Aucun outil ni aucune qualification ne sont nécessaires pour assembler les deux pièces, seul le port des gants est utile.

- Outil : Aucun (1)
- Direction d'accès : Par-dessus (1)
- Temps d'assemblage : 10 secondes (1)
- Qualification des ouvriers : Aucune (1)

- Équipement requis : Gants (2)

Alternative 3 : Assemblage soudé

Il est nécessaire d'utiliser des outils bien plus complexes dans cette solution (poste à souder) ainsi que des équipements de sécurité adaptés. Pour des pièces de faibles dimensions le temps d'assemblage est relativement faible. Enfin les opérateurs doivent avoir des compétences particulières pour être à même d'effectuer l'assemblage.

- Outil : Gros outillages (6)
- Direction d'accès : Sur le côté (2)
- Temps d'assemblage : 30 secondes (3)
- Qualification des ouvriers : Formation (6)
- Équipement requis : Masque (3)

Le chiffre entre parenthèse correspond au numéro de la possibilité choisie. En ce qui concerne l'échelle pour le temps d'assemblage, une échelle allant de 10 à 60 secondes avec un pas de 10 secondes a été choisi. Il est tout à fait possible de choisir une valeur intermédiaire pour les différents paramètres afin de représenter au mieux la situation. En utilisant les pondérations des paramètres et les valeurs que nous venons de présenter nous obtenons alors les résultats suivants :

Alternative 1 :

$$\text{Complexité d'assemblage} = \frac{2}{5} \times 20 + \frac{1}{6} \times 25 + \frac{4.5}{6} \times 35 + \frac{1}{6} \times 10 + \frac{2}{6} \times 10 = 43.4$$

Alternative 2 :

$$\text{Complexité d'assemblage} = \frac{1}{5} \times 20 + \frac{1}{6} \times 25 + \frac{1}{6} \times 35 + \frac{1}{6} \times 10 + \frac{2}{6} \times 10 = 19$$

Alternative 3 :

$$\text{Complexité d'assemblage} = \frac{5}{5} \times 20 + \frac{2}{6} \times 25 + \frac{3}{6} \times 35 + \frac{6}{6} \times 10 + \frac{3}{6} \times 10 = 60.8$$

Nous pouvons observer que l'alternative emboîtement apparaît comme la plus simple à mettre en place. Cela vient essentiellement du fait que ce type d'attachement est particulièrement simple à assembler et réduit au minimum le nombre de pièces et donc le nombre de manipulations. L'assemblage visé est principalement pénalisé par son temps d'assemblage nettement plus long à cause du nombre de pièces plus important à mettre en place. Enfin l'assemblage soudé obtient un score important car il requiert des compétences et des outils particuliers.

3.3.5 Les paramètres de la complexité de désassemblage non destructif

Comme il a été dit précédemment, la complexité de désassemblage se compose de deux parties afin de pouvoir représenter le désassemblage non destructif et semi destructif. Nous allons tout d'abord voir la partie concernant le désassemblage non destructif et le détail des sept paramètres qui la compose.

Force requise

Tout comme pour le temps d'assemblage il est difficile de proposer une échelle absolue répondant correctement à toutes les situations. De plus évaluer l'effort que chaque attachement requiert pour être défait est compliqué à appréhender durant la phase de conception. Cependant, une méthode développée par Sonnenberg (Sonnenberg, 2001) nous permet d'évaluer les efforts nécessaires pour la majorité des attachements. Cette méthode de calcul se base sur plusieurs caractéristiques de chaque type d'attachement comme les dimensions ou encore la forme des têtes de vis par exemple. En utilisant ces données il est possible de classer chaque attachement sur une échelle allant de 0 à 100 qui représente l'effort à exercer pour défaire un attachement. 0 correspondant à aucun effort et 100 à un effort maximal. Le graphique suivant regroupe les valeurs possibles pour chaque type d'attachement.

Attachement	Niveau de la difficulté de démontage										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Boulon											
Clip cantilever											
Clip cylindrique											
Clou											
Vis-écrou											
Circlips											
Vis											
Agrafe											
Velcro/Zipper											

Figure 3.2 : Échelle d'effort de démontage (Sonnenberg, 2001)

Nous utiliserons donc cette méthode qui est très bien adaptée pour mettre en valeur les différences entre plusieurs attachements. En effet, une valeur d'effort précise n'est pas nécessaire car nous souhaitons uniquement différencier les alternatives les unes des autres en fonction de leurs caractéristiques.

Type de fixation

- 1- **Aucune** : Le produit n'a pas besoin de fixation pour être désassemblé.
- 2- **Une main** : Le produit est maintenu d'une main pendant que l'autre effectue les opérations de désassemblage.
- 3- **Deux mains** : Le produit doit être maintenu à deux mains pour que le désassemblage soit possible.
- 4- **Pincés** : Cette possibilité regroupe tous les systèmes simples de fixation tels que des pinces, des étaux... qui assurent la fixation du produit.
- 5- **Système** : La fixation du produit doit se faire par le biais d'un système spécifique. C'est généralement le cas pour les produits de grandes dimensions. Nous pouvons citer l'exemple du désassemblage d'une aile d'avion qui nécessite un système de treuil pour être retenu.

- 6- Automatisé :** Un système automatisé est nécessaire pour que le produit puisse être désassemblé. Ce type de fixation peut être utilisé sur des chaînes de démontage automatisées et est généralement très coûteux.

Outils

- 1- Aucun :** Le désassemblage est effectué à la main
- 2- Pistolet pneumatique :** Un pistolet pneumatique est nécessaire pour effectuer les opérations de désassemblage.
- 3- Outil simple :** Cette catégorie regroupe tous les outils de base tels que tournevis, marteaux, pinces...
- 4- Outils du fabricant :** Certains attachements sont très spécifiques à un fabricant et nécessitent des outils exclusifs.
- 5- Gros outillage :** Les opérations de désassemblage requièrent des outils de forte puissance.
- 6- Outils improvisés :** Dans cette situation, il n'existe aucun outil spécifiquement fait pour désassembler le produit et l'opérateur doit utiliser les différentes ressources dont il dispose.

Direction d'accès

Les différentes possibilités de direction d'accès sont les mêmes que celles présentées dans la partie précédente sur la complexité de désassemblage.

Temps de désassemblage

Le temps de désassemblage est un des paramètres les plus influents cependant c'est également un des plus difficiles à déterminer. En effet, il dépend beaucoup de l'état général du produit. Un produit en parfait état ne posera pas de problèmes particuliers pour être désassemblé et nous pouvons supposer que le temps de désassemblage est proche du temps d'assemblage. Cependant, il n'est pas rare qu'un produit subisse des dégradations au cours de sa durée de vie

qui vont rendre le désassemblage nettement plus long et difficile. Nous pouvons citer par exemple la corrosion des assemblages vissés ou la dégradation des têtes rendant les outils standards inefficaces et dans ces situations le désassemblage non destructif est alors impossible. Ces problèmes sont particulièrement présents pour les attachements discrets (vis, rivets, écrou...). Les attachements solidaires sont moins sujets à ce genre de problèmes car une dégradation de ces attachements entraîne souvent une diminution de l'intensité de la liaison. C'est un problème lorsque les dégradations se produisent durant la durée de fonctionnement cependant d'un point de vue purement désassemblage, ces dégradations sont utiles et parfois nécessaires. En effet, suivant la géométrie des attachements solidaires, leur désassemblage sans endommager les pièces peut s'avérer compliqué voire impossible.

Un article paru en 2003 (Kondo, Deguchi, Hayashi & Obata, 2003) présente les résultats du désassemblage manuel de différents produits communs (ordinateur, réfrigérateur, téléphone portable...) qui ont eu une durée d'utilisation plus ou moins longues (de 2 à 20 ans). Les opérations de désassemblage effectuées ont permis de mettre en avant plusieurs aspects intéressants sur les attachements. Tout d'abord, la majorité des attachements deviennent de plus en plus long à désassembler au fur et à mesure que la durée d'utilisation augmente. Les résultats obtenus pour les attachements rencontrés sont présentés dans la figure 3.3.

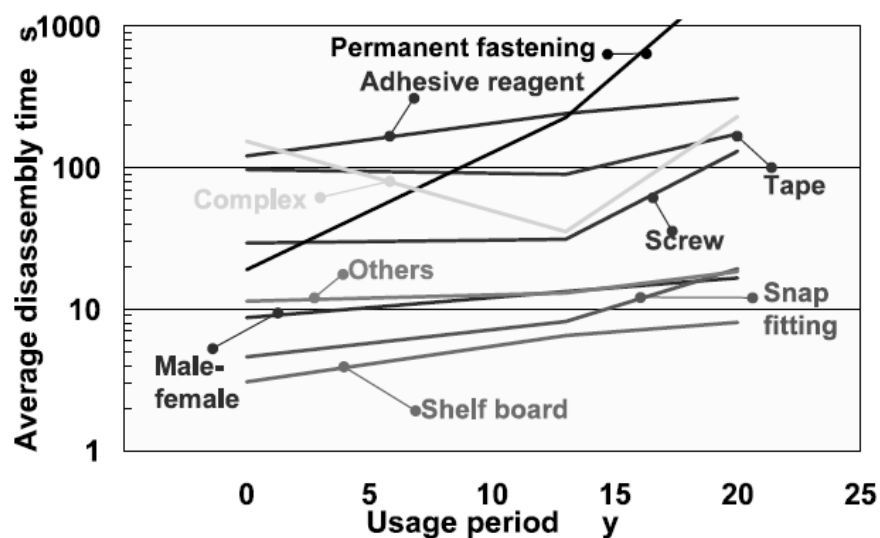


Figure 3.3 : Temps de désassemblage en fonction de la durée d'utilisation (Kondo, Deguchi, Hayashi & Obata, 2003)

A partir de ce graphique et du temps d'assemblage, nous pouvons en déduire une estimation du temps de désassemblage. Le temps d'assemblage est utilisé comme base de référence en partant du principe que le temps de désassemblage est très proche de ce temps pour un attachement en parfait état. Ensuite à l'aide du graphique nous pouvons déterminer un coefficient à appliquer au temps de base en fonction de la durée d'utilisation moyenne du produit étudié et ainsi refléter le vieillissement des attachements.

A cela vient s'ajouter un autre facteur pour les attachements filetés qui va permettre de prendre en compte les problèmes reliés à la corrosion et aux déformations que peuvent subir les attachements. Les opérations de désassemblage ont permis d'évaluer l'impact de ces deux dégradations par rapport à un attachement en bon état. La corrosion augmente en moyenne par deux le temps de désassemblage et les déformations multiplient par près de cinq le temps de désassemblage. Ces deux facteurs sont intéressants à utiliser dans le cas où les produits sont particulièrement sujets à ces problèmes.

Qualification des ouvriers

- 1- Aucune :** Les opérations à effectuer sont évidentes et ne demandent aucune connaissance particulière.
- 2- 10 à 20 secondes :** Un certain temps est nécessaire à l'opérateur pour prendre connaissance des caractéristiques du produit à désassembler.
- 3- Plus de 30 secondes :** Comme pour l'étape précédente, l'opérateur doit préalablement prendre un certain temps pour consulter des bases de données, des plans...
- 4- Discussion :** La complexité du produit impose aux opérateurs d'échanger entre eux afin de déterminer les opérations à effectuer.
- 5- Contact avec le fabricant :** Dans ce cas il est nécessaire de prendre contact avec le fabricant pour déterminer la meilleure manière d'opérer le désassemblage.
- 6- Formation :** Les opérations à effectuer sont complexes et nécessitent une formation spécifique des opérateurs.

Équipement requis

L'équipement requis est similaire à celui des opérations d'assemblage détaillées dans la partie précédente.

3.3.6 Les pondérations choisies pour les paramètres de désassemblage non destructif

Le fonctionnement est le même que pour la complexité d'assemblage. Les différents attachements sont évalués sur une échelle de 0 à 100. Un article paru en 2000 (Das, Yedlarajia & Narendra, 2000) présente une méthode visant à déterminer les coûts relatifs au désassemblage afin de justifier économiquement le désassemblage d'un produit. Le calcul des coûts se fait par le biais du calcul du « Disassembly Effort Index » (DEI) qui est ensuite utilisé pour déterminer le coût estimé global. La complexité de désassemblage fonctionne de la même manière que le DEI et nous nous sommes servis des pondérations utilisées dans ce dernier. Elles sont présentées dans le tableau 3.7.

Tableau 3.7 : Pondérations choisies pour la complexité de désassemblage non destructif

Force requise	20
Type de fixation	15
Outils	10
Accessibilité	15
Temps de désassemblage	25
Qualification des ouvriers	10
Équipement requis	5

3.3.7 Les paramètres de la complexité de désassemblage semi destructif

Nous allons maintenant détailler les paramètres utilisés pour calculer la complexité de désassemblage dans le cas où le désassemblage est effectué de manière semi destructive. Plusieurs paramètres sont communs avec la partie désassemblage non destructif et ne seront pas détaillés de nouveau. C'est le cas des paramètres, Type de fixation, Outils, Direction d'accès, Qualification des ouvriers et Équipement requis. Les autres paramètres ont été modifiés afin de

refléter au mieux les problèmes rencontrés avec ce type de désassemblage. Le paramètre Force requise a été remplacé par Résistance des matériaux car la méthode de calcul utilisé pour le premier n'est plus applicable avec des méthodes semi destructives telles que le sciage. Ces opérations sont plus ou moins longues et difficiles en fonction des caractéristiques des matériaux présents dans le produit (résistance mécanique, dureté...). Nous pouvons prendre l'exemple des rivets en titane qui sont fréquemment utilisés en aéronautique. Le titane ralentit considérablement les opérations, nécessite des changements fréquents d'outils et impose l'utilisation de méthode spécifique.

Résistance des matériaux

- 1- Très faible :** Le matériau nécessite très peu d'efforts pour être découpé ou brisé. Dans cette catégorie nous pouvons classer, les mousses ou les matériaux très cassants.
- 2- Faible :** Une déclinaison de la catégorie précédente qui regroupe des matériaux ne posant pas de problème lors du désassemblage tel que des caoutchoucs, du bois...
- 3- Modérée :** Des matériaux comme les plastiques, certains types de céramiques ou des alliages à faibles caractéristiques mécaniques (cuivre...) sont présents dans cette catégorie.
- 4- Élevée :** Nous retrouvons ici les métaux et certains alliages (aluminium...).
- 5- Très élevée :** Les matériaux de cette catégorie sont très contraignants et ralentissent les opérations de désassemblage. Nous pouvons citer les aciers inoxydables, des alliages de titane ou des aciers trempés.
- 6- Extrême :** L'utilisation de ces matériaux dans le produit rend le désassemblage extrêmement difficile. Les superalliages au nickel ou au cobalt présentent des caractéristiques mécaniques particulières qui rendent les opérations d'usinage ou de sciage difficiles.

Enfin, pour ce qui est du temps de désassemblage, nous ne pouvons pas utiliser la méthode précédente. En effet, les opérations de désassemblage semi destructif effectuées sur un attachement sont complètement différentes de celles effectuées lors de l'assemblage. Il n'est donc pas envisageable de prendre le temps d'assemblage comme temps de référence. Afin d'obtenir un

temps de désassemblage le plus précis possible, nous avons utilisé une méthode de calcul du temps des opérations, la méthode MOST.

La méthode MOST (Maynard Operation Sequence Technique) est apparue en 1967 (Zandin, 2003). Elle a pour but de déterminer le temps nécessaire pour une action donnée et ainsi fournir des informations précieuses qui pourront être utilisées pour calculer des coûts, de planifier au mieux chaque activité... La méthode consiste à décomposer une opération en des actions élémentaires (atteindre une pièce, prendre un outil...). A chaque action est attribué une valeur de temps appelée Time Measurement Units (TMU). Cette unité de temps spécifique à la méthode est définie de la manière suivante :

- 1 heure = 100 000 TMU
- Soit 1 TMU = 0.036 secondes

Une fois toutes les actions prises en compte il est possible de connaître le temps estimé pour effectuer l'opération étudiée. La méthode est facilement applicable à la majorité des opérations et va ainsi nous permettre d'estimer les temps de désassemblage. Il existe trois méthodes différentes : MiniMOST, BasicMOST et MaxiMOST. Suivant le problème étudié il faudra choisir une de ces trois méthodes. MiniMOST est utilisé dans des cas où les efforts sont faibles, les mouvements concentrés dans une zone réduite (toutes les distances de mouvement inférieures à 25cm) et où les opérations sont toujours identiques. BasicMOST est la méthode la plus fréquemment utilisée car elle répond à la majorité des problèmes. En effet, elle permet d'analyser avec une précision suffisante la plupart des actions communément réalisées dans l'industrie. Enfin, MaxiMOST est utilisée dans des cas où les opérations sont longues et où la zone de travail est grande.

Pour estimer les temps de désassemblage nous utilisons la méthode BasicMOST qui est la plus appropriée pour les cas qui sont étudiés. En effet, la méthode MiniMOST est peu appropriée au désassemblage car elle suppose que les opérations sont répétées toujours à l'identique. Or, l'état des pièces qui sont désassemblés posent souvent des problèmes et l'opérateur doit adapter ses méthodes de travail. La méthode MaxiMOST est un bon choix pour analyser le désassemblage de produit de grande dimension (voiture, avion) mais elle ne permet pas d'analyser assez précisément des opérations sur des produits d'usage courant (ordinateur,

imprimante et autres). La méthode BasicMOST est la plus à même de nous fournir des temps précis pour la majorité des produits.

3.3.8 Les pondérations choisies pour les paramètres de désassemblage semi destructif

Les pondérations choisies sont identiques à celles précédemment utilisées pour le désassemblage non destructif. En effet, les paramètres sont similaires, seule la manière d'obtenir les valeurs est modifiée. Il est ainsi possible de comparer des alternatives quel que soit la méthode de désassemblage choisie. Cependant, le résultat obtenu n'est pas satisfaisant car il ne prend pas en compte le fait que des pertes sont engendrées dans le cas d'un désassemblage semi destructif. En effet, si nous comparons le même attachement désassemblé de deux manières différentes, les calculs vont très certainement présenter la méthode semi destructive comme plus intéressante car le temps de désassemblage est plus faible. Mais avec cette méthode des pertes sont générées, que ce soit des pertes de matières, une perte de valeur des pièces à cause des dégradations, un mélange de matériaux diminuant la valeur des matériaux... Il est donc important de prendre en compte ces pertes afin d'affiner le calcul de la complexité pour un désassemblage semi destructif. Nous allons voir dans la partie suivante comment ces pertes sont prises en compte.

3.3.9 Prise en compte des pertes de valeurs

Les pertes de valeurs engendrées lors des opérations d'un désassemblage semi destructif sont de différentes natures. Nous allons donc définir cinq cas différents permettant de représenter un maximum de possibilités. Les cas sont les suivants.

Tableau 3.8 : Les différents cas en désassemblage semi destructif

Cas possibles lors du désassemblage semi-destructif	
Cas 1	Récupération des matériaux, matériaux identiques
Cas 2	Récupération des matériaux, matériaux différents
Cas 3	Récupération des pièces, intactes après désassemblage
Cas 4	Récupération des pièces, remise en état nécessaire
Cas 5	Récupération partielle des pièces et récupération des matériaux

Dans les deux premiers cas, la fin de vie choisie pour les pièces étudiées est une récupération des matériaux. Dans le premier, les matériaux sont identiques et le désassemblage est opéré afin de supprimer les attachements qui risquent de dégrader la qualité ou poser des problèmes lors du retraitement des matériaux. Dans le deuxième cas, les matériaux en présence sont différents et doivent être séparés afin de conserver la meilleure qualité possible. Dans les trois autres cas, une récupération des pièces est souhaitée. Dans le troisième cas, les pièces ne subissent aucune dégradation lors du désassemblage et peuvent être réutilisées ou revendues sans actions supplémentaires. C'est par exemple le cas pour le désassemblage de certains rivets. A l'aide d'un foret de diamètre inférieur au rivet, ce dernier est percé. Il suffit ensuite de retirer le rivet et de libérer les pièces sans dommages. Dans le cas 4, lors du désassemblage des attachements les pièces sont endommagées et une remise en état est nécessaire. Enfin dans le cinquième cas, seule une partie des pièces est récupérée, l'autre partie sera seulement récupérée pour les matériaux. Une remise en état des pièces récupérées peut être nécessaire.

Maintenant que les différents cas sont déterminés, nous devons calculer quels sont les pertes de valeurs associées. Durant la phase de conception préliminaire il n'est pas évident de parvenir à calculer précisément quelles vont être les pertes lors du désassemblage. Pour simplifier le problème, nous avons choisi des données facilement accessibles qui vont permettre de calculer une perte de valeur en pourcentage de la valeur maximale qui aurait pu être récupérée. Les données nécessaires pour chacun des cas sont données dans le tableau suivant.

Tableau 3.9 : Données nécessaires au calcul des pertes de valeur

	Données	Explications
Cas 1	Pertes de volume en %	Lors du désassemblage une portion des matériaux ne peut pas être récupérée. Ces pertes sont données en % du volume total avant désassemblage.
	Rapport de volume entre les matériaux	Le volume de chaque matériau est différent. Le rapport est défini de la manière suivante : le matériau 1 est X fois plus présent que le matériau 2.
Cas 2	Pertes de volume en %	Voir Cas 1
	Rapport de valeur entre les matériaux	Le prix de revente des matériaux est différent et il est défini de cette façon : le matériau 1 est X fois plus intéressant que le matériau 2.
Cas 3	/	Il n'y a aucune perte dans cette situation.
Cas 4	Coûts de remise en état en %	Les pièces doivent être remises en état. Le coût est exprimé en % de la valeur maximale de la pièce
	Rapport de valeur entre les pièces	Tout comme pour les matériaux, les pièces sont plus ou moins intéressantes.
Cas 5	Coût de remise en état en %	Voir Cas 4
	Perte de volume en %	Voir Cas 1
	Rapport de valeur entre les pièces et les matériaux	La valeur des pièces et la valeur totale d'un matériau est comparée de la façon suivante : La pièce a X fois plus de valeur que la valeur totale du matériau

Nous allons maintenant détailler les calculs pour chacun des cinq cas présentés avec un exemple pour chacun afin de vérifier l'exactitude des formules de calcul. Les formules sont données pour un assemblage de 2 pièces ou sous assemblages distincts. Cela correspond à une majorité de cas, la formule peut être étendue si trois parties ou plus sont désassemblées lors de la même opération. Enfin, il est important de préciser que les pertes de volume peuvent également être exprimées comme des pertes de masses.

- **Cas 1** : Avec des matériaux identiques la perte de valeur correspond directement aux pertes de volumes pondérées par la répartition des volumes.

$$Pertes = \frac{Pvol1 \times Rvol}{Rvol + 1} + \frac{Pvol2}{Rvol + 1}$$

Pvol1 : Perte en % du volume de la pièce 1

Pvol2 : Perte en % du volume de la pièce 2

Rvol : Rapport de volume entre les deux pièces

Exemple : Les pertes sur la pièce 1 sont de 10%, les pertes sur la pièce 2 sont de 20%, la pièce 1 est 5 fois plus volumineuse que la pièce 2.

Pertes = 11.67%

Vérification : La récupération totale des matériaux de la pièce 1 rapporte 100\$ donc celle de la pièce 2 rapporte 20\$ (5 fois moins de matière). Il est donc possible de récupérer 120\$ au maximum. Les pertes correspondent à 10\$ pour la pièce 1 et 4\$ pour la pièce 2 soit un total de 14\$ de perte. En effectuant le rapport des pertes sur la valeur maximale récupérable nous obtenons bien 11.67%.

- **Cas 2** : Lorsque les matériaux sont différents il est nécessaire de prendre en compte la différence de valeur des deux matériaux. Pour cela le paramètre R_{val} est utilisé afin d'estimer le rapport de valeur entre les pièces 1 et 2. Dans le cas d'une récupération des matériaux la valeur d'une pièce peut être obtenue en consultant des sites spécialisés qui fournissent le prix de vente des différents matériaux et en le multipliant par la masse ou le volume des pièces. Le site internet de l'American Market Metal est un exemple qui regroupe les prix de vente de la majorité des métaux pour la région Amérique du nord. La formule de calcul est la suivante :

$$Pertes = \frac{Pvol1 \times Rval}{Rval + 1} + \frac{Pvol2}{Rval + 1}$$

$Pvol1$: Perte en % du volume de la pièce 1

$Pvol2$: Perte en % du volume de la pièce 2

$Rval$: Rapport de valeur entre les deux pièces

Exemple : La valeur de la pièce 1 est estimée comme étant 4 fois supérieure à celle de la pièce 2. Les pertes sur la pièce 1 sont de 10% et celles sur la pièce 2 sont de 20%.

Pertes = 12%

Vérification : La pièce 1 a une valeur estimée de 100\$ donc la pièce 2 à une valeur de 25\$. La valeur maximale récupérable est donc de 125\$. Les pertes correspondent à 10\$ et 5\$ soit 15\$ au total. Le rapport des pertes par la valeur maximale récupérable nous amène bien à 12% de perte.

- **Cas 3** : Dans ce cas il n'y a pas de perte, donc pas de calcul nécessaire.
- **Cas 4** : Ce cas est similaire au cas 2 sauf que les pertes ne sont plus causées par une perte de matière mais par un coût de remise en état des pièces.

$$Pertes = \frac{Cre1 \times Rval}{Rval + 1} + \frac{Cre2}{Rval + 1}$$

Cre1 : Coût de remise en état de la pièce 1 en % de sa valeur

Cre2 : Coût de remise en état de la pièce 2 en % de sa valeur

Rval : Rapport de valeur entre les deux pièces

Exemple : Le coût de remise en état pour la pièce 1 est estimé à 10% de la valeur de la pièce et celui pour la pièce 2 à 5%. La pièce 1 a 3 fois plus de valeur que la pièce 2.

$$Pertes = 8,75\%$$

Vérification : La pièce 1 vaut environ 90\$ avec un coût de remise en état de 9\$, la pièce 2 vaut 30\$ avec un coût de remise en état de 1,5\$ soit au total 10,5\$. En effectuant le rapport du coût de remise en état et de la valeur maximale nous obtenons bien 8,75% de perte.

- **Cas 5** : Ce dernier cas est un mélange des cas précédents avec à la fois une perte de matière et un coût de remise en état.

$$Pertes = \frac{Cre \times Rval}{Rval + 1} + \frac{Pvol}{Rval + 1}$$

Cre : Coût de remise en état de la pièce en % de sa valeur

Pvol : Perte en % du volume de la pièce

Rval : Rapport de valeur entre la pièce et la valeur des matériaux

Exemple : Le coût de remise en état est de 15%, la perte de matière est de 10% et la pièce est estimée comme 6 fois plus intéressante que la récupération des matériaux.

Pertes = 14.29%

Vérification : La pièce récupérée vaut 60\$, avec un coût de remise en état de 9\$. La valeur des matériaux récupérés est de 10\$ au maximum. Les pertes s'élèvent à 1\$ soit au total 10\$ de pertes pour 70\$ de valeur récupérable dans le meilleur des cas et donc bien 14.29% de pertes.

Il est encore nécessaire d'apporter une pondération entre les différents cas. En effet, les pertes obtenues avec les calculs précédents nous permettent d'évaluer les pertes sur la valeur maximale récupérable avec la fin de vie choisie définie pour chaque pièce. Or certaines fin de vie sont bien plus intéressantes que d'autres. Il est en effet souvent plus intéressant de pouvoir récupérer une pièce intacte qui aura bien plus de valeur que les matériaux qui la compose. Pour pondérer les différents cas nous allons introduire deux nouveaux paramètres :

- **Rapport de valeur entre la récupération des pièces et des matériaux** : Ce rapport correspond à, la récupération des pièces est X fois plus intéressante que la récupération des matériaux. Avec ce rapport nous allons pouvoir pondérer les cas 1 et 2 par rapport aux cas 3 et 4.
- **Rapport de valeur entre la récupération totale ou partielle des pièces** : Ce rapport correspond à, la récupération de toutes les pièces est X fois plus intéressante que la récupération partielle des pièces et des matériaux. Nous allons pouvoir pondérer le cas 5 par rapport aux cas 3 et 4.

Les formules de calculs finales sont les suivantes pour les cas 1, 2 et 5:

$$Pertes\ totales = \frac{Rval - 1}{Rval} + \frac{Pertes\ Cas}{Rval}$$

Rval : Un des deux rapports défini au-dessus suivant le cas pris en compte

Pertes Cas : Les pertes de valeurs calculées pour les différents cas

Si tous les cas envisagés sont les mêmes ces rapports ne sont pas nécessaires.

Finalement le calcul de ces pertes de valeur nous permet d'apporter une correction aux scores obtenus pour les alternatives où un désassemblage semi destructif est effectué.

3.4 Application de la méthode ANP

Nous allons maintenant nous intéresser plus en détail à la méthode ANP en détaillant les différents choix qui ont été faits pour mettre en place toutes les parties. Nous verrons tout d'abord le réseau entre les groupes, puis la matrice de connexion permettant de définir toutes les relations possibles entre les paramètres, et enfin les différentes comparaisons qui ont été faites entre les paramètres seront présentées.

3.4.1 Le réseau

Dans les parties précédentes nous avons détaillés les différents paramètres pour chacune des trois étapes du cycle de vie d'un produit, assemblage, utilisation et désassemblage. Chaque étape correspond à un groupe dans la méthode ANP. A cela nous avons ajouté un groupe contenant les différentes alternatives qui seront envisagées. Il est ensuite nécessaire de définir les relations qui existent entre chacun des groupes pour former le réseau est présenté ci-dessous dans la figure 3.5.

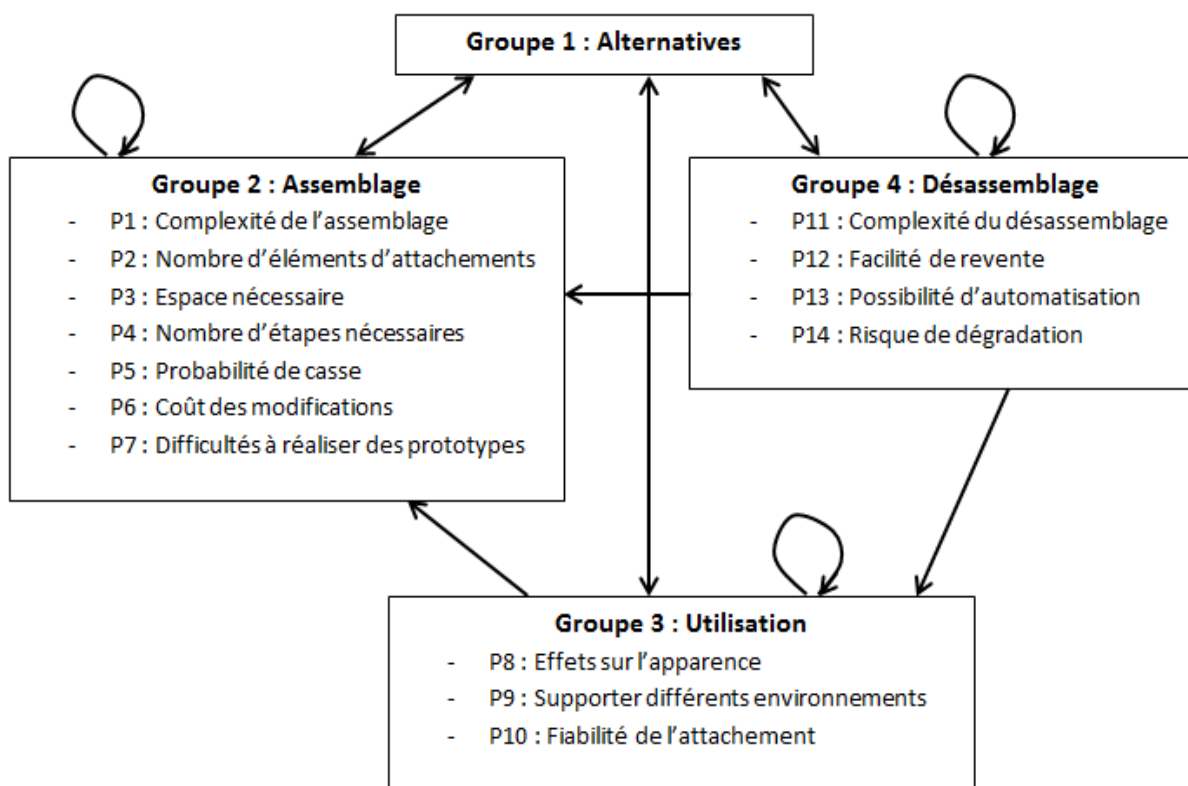


Figure 3.4 : Réseau de la méthode ANP

Le groupe 1 est relié aux trois autres groupes par des doubles flèches car le choix des alternatives est influencé par les différents paramètres mais le choix d'une alternative influence également les paramètres en fonction de ses caractéristiques propres. Les autres relations entre les groupes 2, 3 et 4 ont été définies en suivant le cycle de vie d'un produit. Nous pouvons remarquer que le groupe 2 a une influence sur les deux autres groupes et que le groupe 3 a seulement une influence sur le groupe 4. Il est logique que le groupe 4 n'ait pas d'influence sur les groupes 2 et 3 car dans le cycle de vie d'un produit le désassemblage survient une fois les deux autres étapes terminées. Les opérations d'assemblage ne sont pas dépendantes de l'utilisation du produit ou du désassemblage.

3.4.2 La matrice de connexion

Les relations entre les groupes ont été déterminées, il est maintenant nécessaire de définir l'ensemble des relations entre les différents paramètres et les alternatives. L'article rédigé par Güngör en 2006 (Güngör, 2006) a servi de base de réflexion pour définir les relations. Elles sont

rassemblées dans la matrice de connexion. Pour plus de lisibilité la matrice de connexion a été réduite à la partie des relations entre les paramètres. La forme générale est donnée par la suite. Il faut ajouter une ligne et une colonne pour chaque alternative envisagée. Étant donné que les alternatives sont reliées à tous les paramètres les lignes et les colonnes correspondantes sont remplies de 1. Les alternatives sont indépendantes entre elles ce qui crée un bloc de 0.

Tableau 3.10 : Matrice de connexion simplifiée

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
P1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P2	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
P3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
P4	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1
P5	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1
P6	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
P7	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
P8	0							0	0	1	0	0	0	0
P9								1	0	1	1	1	1	1
P10								1	0	0	1	1	1	1
P11	0							0			0	1	1	0
P12											0	0	0	0
P13											1	0	0	0
P14											1	1	1	0

Tableau 3.11 : Forme générale de la matrice de connexion

	A1	A2	An	P1	P2	P3	Pn
A1	0			1	1	1	1
A2				1	1	1	1
An				1	1	1	1
P1	1	1	1	Matrice de connexion simplifiée			
P2	1	1	1				
P3	1	1	1				
Pn	1	1	1				

Cette matrice de connexion permet de savoir quels paramètres influencent un paramètre et ainsi de savoir quelles comparaisons vont devoir être faites dans la suite de la démarche. Comme expliqué dans la partie traitant de la méthode ANP, la lecture se fait en colonne et groupe par groupe. Par exemple pour le groupe Assemblage qui regroupe les paramètres P1 à P7 nous pouvons voir que le paramètre P5, Probabilité de casse est lié aux paramètres P1, Complexité de l'assemblage, P2, Nombre d'éléments d'attachement et P4, Nombre d'étapes nécessaires. En effet, plus l'assemblage sera complexe et/ou le nombre d'attachements élevé, et plus les risques d'endommagement seront importants. Il en est de même pour le nombre d'étapes nécessaires.

En suivant la matrice de connexion simplifiée nous allons pouvoir effectuer toutes les comparaisons nécessaires. Une matrice de comparaison est créée par paramètre et par groupe. Il y aura donc 14 matrices pour le groupe Assemblage (7+3+4), 7 pour le groupe Utilisation (3+4) et 4 pour le groupe désassemblage, soit 25 matrices de comparaisons pour l'ensemble des paramètres.

3.4.3 Les matrices de comparaison pour les paramètres

Étant donné le nombre important de matrices à créer, nous ne détaillerons qu'un cas à titre d'exemple. Le premier exemple que nous allons voir concerne le paramètre P6, Coûts des modifications, pour la phase Assemblage. La matrice de connexion nous montre que ce paramètre est relié à trois autres paramètres qui sont :

- P1 : Complexité de l'assemblage
- P5 : Probabilité de casse
- P7 : Difficultés à réaliser des prototypes

La matrice de comparaison est une matrice carrée de dimension 3 (la dimension dépend du nombre de paramètres lié au paramètre de référence). Elle est donnée ci-dessous.

Tableau 3.12 : Matrice de comparaison pour le paramètre P6

	P1	P5	P7
P1	1	5	3
P5	1/5	1	1/2
P7	1/3	2	1

Tout d'abord la diagonale de la matrice est toujours remplie de 1, un paramètre ne peut pas être plus ou moins important que lui-même. Ensuite pour remplir les cellules manquantes il faut répondre à une question du type :

En considérant le coût des modifications, qu'est ce qui est le plus important entre la complexité d'assemblage et le risque de casse ? Et de combien ?

Dans notre cas la complexité d'assemblage a été considéré comme largement plus importante que le risque de casse (voir le tableau 9 détaillant l'échelle de comparaison utilisée pour la méthode ANP), ce qui correspond à la valeur 5. Toujours avec le même raisonnement, la complexité d'assemblage a été considérée comme modérément plus importante que la difficulté à réaliser des prototypes, valeur 3 dans la matrice. La dernière comparaison à faire est entre les paramètres P5 et P7 Les cellules sous la diagonale sont égales à l'inverse des valeurs au-dessus de la diagonale d'après le principe de réciprocité (Saaty, 1996). Le choix de la dernière valeur est dépendant des valeurs choisies lors des deux autres comparaisons. En effet, nous ne pouvons pas dire que le risque de casse est indéniablement plus important que la difficulté à réaliser des prototypes,

valeur 9, alors que les comparaisons faites avec le paramètre P1 montrent que P5 et P7 sont assez proches en importance (valeur 5 et 3). Pour respecter cette contrainte nous avons fait le choix de considérer P7 comme faiblement plus important que P5, valeur 2. Une valeur ne respectant pas les contraintes conduirait à une matrice inconsistante. Avec les choix que nous avons faits, nous obtenons une valeur d'inconsistance de 0.0036 qui est bien inférieure à la limite fixée de 0.1. En choisissant la valeur 9 plutôt que 2, l'inconsistance est égale à 0.3119, ce qui est nettement supérieure à la limite de 0.1.

Nous avons choisi de telles valeurs car le coût des modifications est principalement influencé par la complexité de la conception qui est une des composantes de la complexité d'assemblage. Une fois ces choix faits et la consistance de la matrice vérifiée, nous pouvons calculer les priorités pour cette matrice. Les valeurs obtenues seront ensuite insérées dans la supermatrice.

3.4.4 Les modèles d'attachements

Avec les matrices de comparaison relatives aux paramètres nous avons rempli une partie de la matrice globale. L'autre partie correspond aux relations entre les alternatives envisagées et les paramètres. A chaque nouveau cas étudié il est nécessaire de créer des matrices de comparaison pour représenter l'influence des alternatives sur les paramètres et inversement. Si nous prenons l'exemple d'un cas contenant quatre alternatives différentes. Pour chaque alternative il faudra créer trois matrices représentant l'influence des paramètres (une matrice par phase du cycle de vie). Et il faudra également générer quatorze matrices (une par paramètre) pour représenter l'influence des alternatives sur les paramètres. Soit un total de 26 matrices. Le temps pour obtenir un résultat serait bien trop long. Pour pallier à ce problème nous avons décidé de créer des modèles d'attachements pour les types les plus fréquemment utilisés. Nous avons donc créé l'ensemble des matrices de comparaisons nécessaires et lors de l'utilisation de la méthode, il suffit de choisir à quel type d'attachement l'alternative appartient. Il est toujours possible d'apporter des modifications à ces modèles prédéfinis afin de caractériser au mieux un attachement et affiner le calcul. Nous avons défini six types d'attachements dont nous allons détailler les caractéristiques principales :

- **Vis :** Les vis sont très fréquemment utilisées dans un assemblage. Elles présentent de nombreux avantages en désassemblage car elles permettent un désassemblage sans dommages et ce sont des attachements fiables. Aucun outil spécifique n'est requis que ce soit pour l'assemblage ou le désassemblage. Elles sont toutefois sujettes à des problèmes de corrosion rendant le désassemblage difficile et elles peuvent représenter des polluants lorsqu'une récupération des matériaux est désirée.
- **Vis-écrou :** Le système vis-écrou possède des caractéristiques similaires aux vis. Il nécessite toutefois un nombre plus important de pièces et un espace plus grand.
- **Rivet :** Les rivets sont une très bonne alternative car ils assurent une fixation sûre et efficace des pièces. Ils sont également très intéressants sur le plan esthétique et d'intégration aux pièces. Ils sont néanmoins plus difficiles à désassembler et peuvent présenter des problèmes de fiabilité dans certains cas.
- **Attachement solidaire :** Ce type d'attachement présente de nombreux avantages du point de vue de l'assemblage. En effet, il diminue le nombre de pièces à assembler puisqu'il est directement intégré aux pièces. Il n'y a pas non plus de problème lié à la compatibilité des matériaux. Cependant, le design est souvent plus complexe et très spécifique ce qui pose des problèmes pour apporter des modifications au produit. Leur désassemblage peut être difficile voire impossible suivant les caractéristiques choisies.
- **Colle :** Les colles sont présentes sous de nombreuses compositions en fonction des contraintes à respecter (matériaux, environnement...). Elles présentent l'intérêt d'être très bien intégrées au produit ce qui est avantageux sur le plan esthétique. De plus leur mise en place impose moins de contraintes au design des pièces (aucun perçage...) ce qui facilite les modifications et les tests. Elles nécessitent cependant d'avantage de précautions car elles sont d'avantages impactées par les conditions d'utilisation (humidité, température...). Leur désassemblage est difficile et nécessite souvent une destruction d'une partie des pièces.

- **Soudure :** Les procédés de soudure présentent de très bonnes qualités de résistance. Ils permettent également de réduire le nombre de pièces. Par contre, leur utilisation peut être limitée en fonction des matériaux choisis et l'assemblage est considéré comme permanent. Cela implique une impossibilité de réaliser des opérations de maintenance et les pièces ne pourront pas être récupérées intactes. Les outils nécessaires sont également plus contraignants et nécessitent des ouvriers qualifiés.

L'utilisation de ces modèles d'attachement permet de simplifier l'utilisation de la méthode et de réduire le temps nécessaire pour obtenir un résultat.

3.4.5 L'importance donnée aux différentes phases du cycle de vie

La dernière étape des comparaisons consiste à déterminer l'importance des groupes du modèle. Cela permettra d'appliquer des coefficients aux blocs de la supermatrice rassemblant toutes les comparaisons. Le point intéressant se situe au niveau de l'importance des trois phases du cycle de vie. En effet, les attachements présentent des avantages dans certaines phases de la vie du produit et des inconvénients dans d'autres. En privilégiant l'une ou l'autre des phases du cycle de vie, le résultat sera différent et un type d'attachement plus ou moins intéressant. Les trois phases peuvent être aussi importantes les unes que les autres ou nous pouvons considérer que certaines phases sont nettement plus importantes. Par exemple, si l'objectif du produit est premièrement d'assurer un désassemblage efficace, la phase désassemblage sera considérée comme largement plus importante que les deux autres. Et inversement si l'objectif du produit est d'assurer le meilleur assemblage possible. Nous effectuerons par la suite des calculs avec des importances différentes afin de voir l'influence possible sur le choix d'une alternative.

3.4.6 La démarche à suivre

Dans cette partie nous allons détailler la démarche à suivre pour mettre en application cette méthode de choix des attachements et quelles sont les informations à définir au préalable. La démarche à suivre peut se résumer grâce au graphique ci-dessous (figure 3.5).

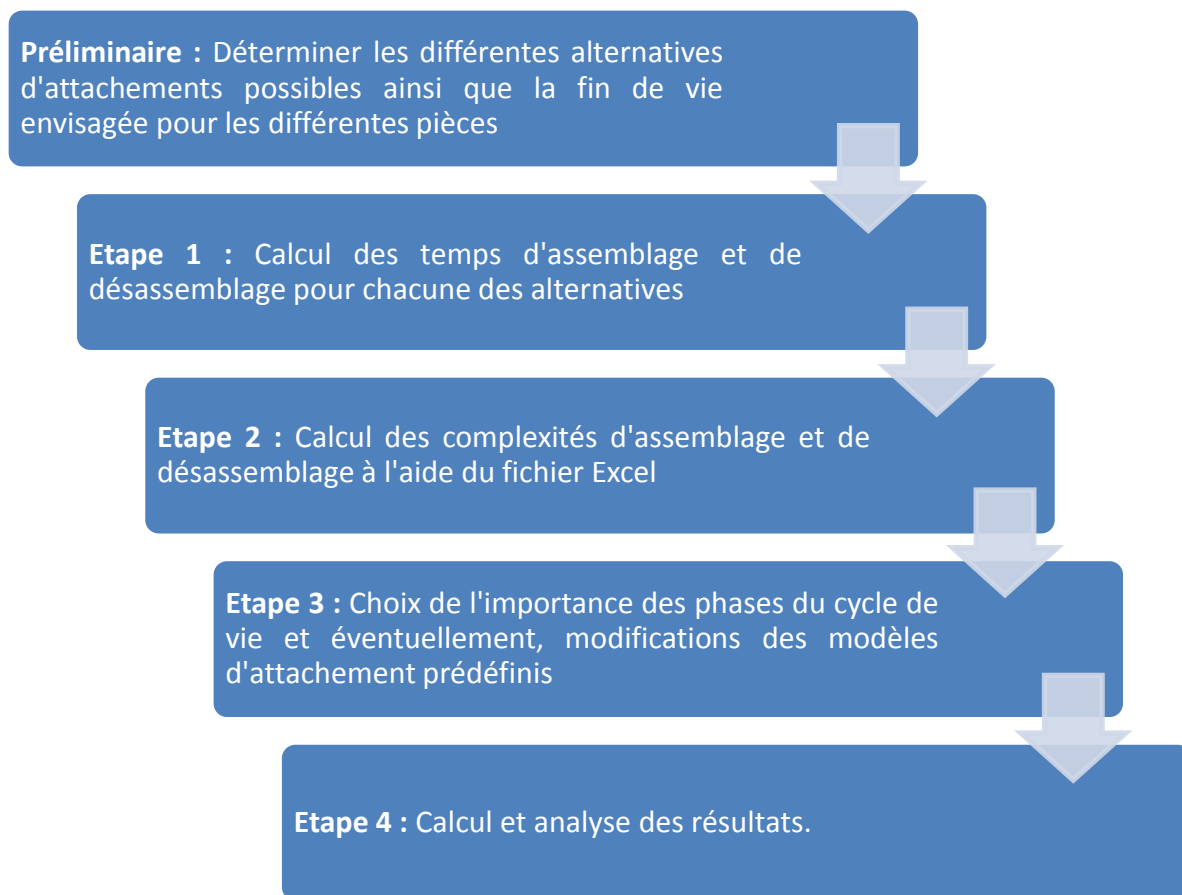


Figure 3.5 : Démarche d'utilisation de la méthode

3.4.6.1 Étape préliminaire

Cette étape est à effectuer en amont de la méthode de choix des attachements. Le concepteur doit définir les différentes alternatives d'attachements possibles pour réaliser un assemblage. Ces alternatives doivent bien évidemment répondre aux exigences en termes de résistance et d'encombrement. Effectuer un calcul avec une alternative qui au final ne pourra pas être mise en place car elle ne respecte pas toutes les exigences est une perte de temps. Le concepteur doit également déterminer une fin de vie pour chacune des pièces de l'assemblage. Cela permet de déterminer la méthode de désassemblage à privilégier et également les calculs à effectuer par la suite.

3.4.6.2 Étape 1 : Calcul des temps d'assemblage et de désassemblage

Pour mettre en application la méthode, il est nécessaire de connaître les temps d'assemblage et de désassemblage pour chacune des alternatives envisagées. Ils peuvent être déterminés de différentes façons. Dans le cas d'une reconception ou si un assemblage similaire a déjà été utilisé, les temps peuvent être déterminés par expérience. Sinon, il est nécessaire d'utiliser des méthodes de calcul comme la méthode proposée par Boothroyd pour les temps d'assemblages ou la méthode BasicMOST pour les temps de désassemblage.

3.4.6.3 Étape 2 : Calcul des complexités

Une fois les temps de désassemblage obtenus, nous pouvons utiliser le fichier Excel dédié pour calculer les complexités d'assemblage et de désassemblage qui seront ensuite utilisées dans la méthode ANP. Les pondérations données aux différents paramètres sont des valeurs préconisées, le concepteur peut faire le choix de les modifier en fonction des contraintes spécifiques de l'assemblage ou des ressources de l'entreprise.

3.4.6.4 Étape 3 : Choix des poids donnés aux différents éléments

Suivant les objectifs visés, l'importance des phases du cycle de vie du produit sera différente. Le concepteur peut faire le choix de privilégier l'assemblage ou le désassemblage, ou encore estimer que toutes les phases sont aussi importantes les unes que les autres, tout dépend du produit, des exigences du fabricant... De plus il peut également modifier les modèles d'attachements prédéfinis pour affiner les calculs, voire même en créer un nouveau si les modèles proposés n'encadrent pas une des alternatives envisagée.

3.4.6.5 Étape 4 : Calcul et analyse des résultats

Toutes les données ont été définies, les calculs peuvent être effectués afin de déterminer les alternatives les plus intéressantes. Il peut être intéressant d'effectuer plusieurs calculs en modifiant l'importance des groupes ou des pondérations afin de voir l'influence des différentes composantes et de faire le meilleur choix possible.

3.4.7 Création des programmes informatiques

Toutes les données nécessaires à la méthode ANP ont été définies dans les parties précédentes, nous allons maintenant nous intéresser à la mise en application de la méthode. Deux logiciels ont été utilisés pour effectuer l'ensemble des calculs. Tout d'abord, nous utilisons le logiciel Microsoft Excel afin de déterminer les complexités d'assemblage et de désassemblage. Puis la méthode ANP a été programmée sur le logiciel Matlab.

Maintenant que nous avons détaillé toutes les parties de la méthode nous allons pouvoir nous intéresser à sa mise en application sur différents cas.

CHAPITRE 4 EXEMPLES D'APPLICATION DE LA MÉTHODE

Nous allons voir dans ce chapitre la mise en application de la méthode sur différents exemples. Le premier exemple est un cas très général permettant d'analyser un maximum d'alternatives d'attachements différentes. Le cas suivant est un exemple plus concret, nous analyserons les alternatives d'assemblage retenues pour réaliser la fixation d'un circuit imprimé dans un boîtier.

4.1 Premier cas d'application

Dans cet exemple nous allons nous intéresser à un cas très simple avec lequel nous allons pouvoir prendre en compte les six types d'attachements prédéfinis et créer un guide général avec les intérêts ou les problèmes de chaque type d'attachements en fonction de la phase du cycle de vie qui est privilégiée. Le cas étudié concerne l'assemblage de deux blocs en matières plastiques. Nous allons détailler dans les parties suivantes les différentes alternatives ainsi que les principaux choix faits en termes d'assemblage et de désassemblage (outils, technique, temps...). Le principal intérêt de ce cas est d'être très complet, en effet il prend en considération tous les modèles d'attachements prédéfinis. Le désassemblage est effectué de manière non-destructive pour certaines alternatives et de manière semi-destructive pour d'autres. Par conséquent nous allons pouvoir utiliser l'ensemble des outils présentés dans les chapitres précédents : les complexités d'assemblage et de désassemblage, le système de calcul des pertes de valeurs et au final la méthode ANP par le biais du programme Matlab que nous avons développé.

4.1.1 Les alternatives envisagées

Comme il a été dit précédemment, les alternatives envisagées correspondent aux six types d'attachements prédéfinis à savoir :

- **Assemblage vis-écrou : Fixation par 4 vis et écrous plastiques M6**

Une vue du produit est donnée dans la figure 4.1. Dans cette alternative, les blocs ont des pattes de fixation permettant l'installation des vis. A l'aide de la méthode de Boothroyd nous avons pu déterminer le temps d'assemblage pour cette configuration qui est de 48,32 secondes. Un désassemblage non destructif a été choisi. Nous considérons que le risque de dégradation des pièces est faible (pas de déformations des vis), de plus les attachements étant en matière

plastique, ils ne sont pas sujets à la corrosion. Nous pouvons donc prendre comme temps de désassemblage un temps proche du temps d'assemblage soit environ 45 secondes. Le temps de désassemblage est estimé comme inférieur au temps d'assemblage car nous supposons que lors du désassemblage la précision des opérations est moindre (pas d'insertion précise ou d'alignements à respecter). En ce qui concerne les outils, une visseuse électrique et une clé sont nécessaires pour l'assemblage et le désassemblage. L'accessibilité aux attachements se fait par le dessus et les opérations à effectuer ne requièrent aucune qualification ou entraînement particulier. Enfin l'application de la méthode développée par Sonnenberg nous donne un résultat de 46 pour la force de désassemblage (échelle de 0 à 100).

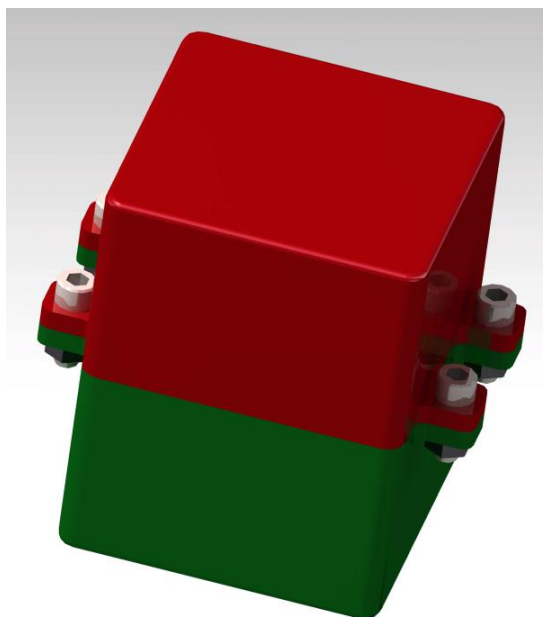


Figure 4.1 : Assemblage vis-écrou

- **Assemblage vissé : Fixation par 2 vis CHC plastiques M8**

L'assemblage est réalisé grâce à deux vis installées dans des trous lamés. Une vue de la pièce avec les trous lamés est donnée dans la figure 4.2. Deux trous taraudés sont réalisés dans l'autre bloc. Dans ce cas le temps d'assemblage est nettement diminué et vaut 22,6 secondes. Les conditions d'utilisation de l'assemblage sont les mêmes que celles citées précédemment, nous retiendrons donc un temps de désassemblage d'environ 20 secondes. Une visseuse électrique est requise pour effectuer les opérations d'assemblage et de désassemblage. Concernant l'effort de

désassemblage, nous obtenons une valeur de 45. L'accessibilité s'effectue également par le dessus.



Figure 4.2 : Vue du positionnement des trous lamés

- Assemblage riveté : Fixation par 4 rivets plastiques

Le design des pièces est similaire à celui présenté pour l'assemblage vis-écrou. Nous avons évalué le temps d'assemblage à 40,6 secondes, toujours avec la même méthode. Dans ce cas le désassemblage est moins évident car les rivets ne sont pas réversibles. Un désassemblage semi destructif est donc envisagé, les rivets seront percés pour détruire la tête de fixation puis retirés. Le temps de désassemblage a été déterminé à l'aide de la méthode Basic MOST. Nous obtenons un temps de 19,44 secondes. Une pince à riveter est utilisée pour mettre en place les rivets. Pour le désassemblage, une perceuse électrique est nécessaire. Les rivets étant en plastique, leur résistance mécanique peut être considérée comme modérée. Un entraînement simple est nécessaire pour familiariser l'opérateur avec la technique de désassemblage des rivets. L'accessibilité aux attachements se fait toujours par le dessus.

- Assemblage emboité : Fixation par 4 clips cantilever

Les clips cantilever sont un des attachements solidaires possibles. Ils présentent l'intérêt d'être directement liés aux pièces et par conséquent de réduire le nombre de pièces de l'assemblage (figure 4.3). Le temps d'assemblage de 9,5 secondes est nettement inférieur à ceux obtenus pour

les autres alternatives déjà présentées. De plus aucun outil n'est requis pour réaliser la fixation. Cependant, le désassemblage peut s'avérer plus compliqué qu'avec des attachements discrets. En effet, si l'angle de rétention est important (plus de 85°) alors le désassemblage sans endommager les attachements est presque impossible. Nous nous placerons dans ce cas de figure. Le désassemblage sera donc qualifié de semi destructif car nous allons devoir déformer avec une pince les clips de fixation pour libérer les pièces. Le temps de désassemblage obtenu par le biais de la méthode BasicMOST est de 13,68 secondes. Lors de l'assemblage, la direction d'accès se fait par le dessus, et en désassemblage l'accès aux attachements se fait sur les côtés.

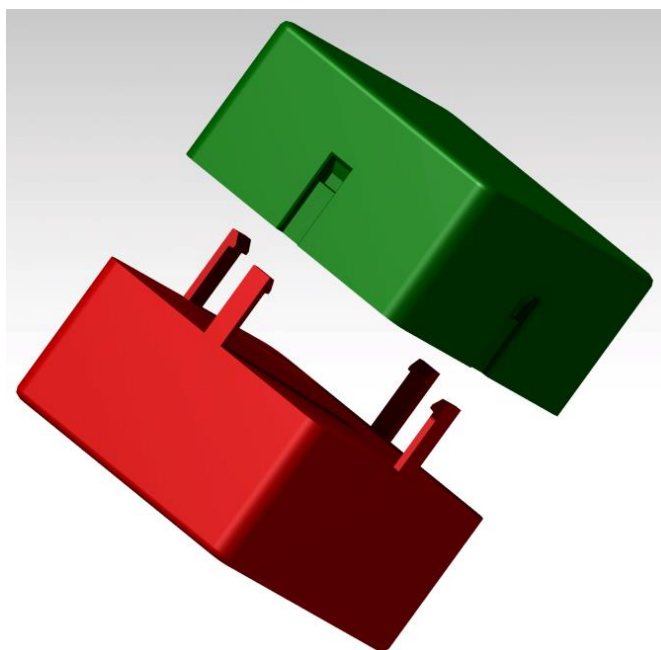


Figure 4.3 : Assemblage par clips cantilever

- Assemblage soudé : Soudage des deux pièces

La forme des pièces est des plus simples dans ce cas, en effet le soudage ne requiert pas de géométrie spécifique. Le temps d'assemblage estimé est de 17 secondes. La liaison peut être considérée comme permanente et un désassemblage semi destructif devra être effectué si nous voulons séparer les pièces. Nous avons choisi de tronçonner les pièces au niveau de la soudure (scie à ruban par exemple). La méthode BasicMOST donne un temps de désassemblage d'environ 7,56 secondes. Avec cette méthode de désassemblage une certaine portion des pièces

est perdue et réduit donc la valeur récupérable. L'assemblage requiert une formation spécifique des opérateurs afin d'assurer la qualité de la liaison. Pour ce qui est du désassemblage, un masque et des gants sont requis pour assurer la protection de l'opérateur.

- Assemblage collé

A l'aide d'une colle appropriée aux matériaux utilisés, les deux pièces sont liées entre elles de façon quasi permanente. Tout comme pour le cas précédent, un tronçonnage des pièces est envisagé pour les désassembler. Le temps d'assemblage est estimé à 22 secondes et celui de désassemblage est identique au précédent soit 7,56 secondes.

4.1.2 Les situations envisagées

Afin de mettre en évidence les possibilités que la méthode propose nous allons détailler deux situations différentes. Dans la première situation, les pièces ayant peu d'intérêt à être réutilisées, seront désassemblées dans le but de récupérer les matériaux. Dans la seconde situation par contre, nous supposons que les pièces ont une valeur bien supérieure à celle des matériaux lorsqu'elles peuvent être récupérées sans dommages.

4.1.3 Première situation : Récupération des matériaux

Le tableau Excel permettant de calculer les complexités d'assemblage et de désassemblage a été rempli avec les données détaillées dans la partie sur les différentes alternatives prises en compte. Il est présenté en annexe 1.

Comme nous l'avons dit précédemment, une récupération des matériaux est envisagée dans cette situation. Un désassemblage semi destructif a été choisi pour les alternatives, rivets, cantilever, soudage et colle. Le cas de désassemblage correspond au cas 2 : récupération des matériaux, matériaux différents. Dans le cas des assemblages rivetés et emboîtés, le désassemblage n'engendre aucune perte de matière donc aucune perte de valeur. Par contre pour les assemblages soudé et collé, le tronçonnage des pièces pour séparer les matériaux entraine une petite perte de matière. Les détails concernant le calcul des pertes sont donnés dans l'annexe 2.

Le tableau qui suit regroupe les résultats pour différentes valeurs données aux groupes Assemblage, Utilisation et Désassemblage. Le détail des cas est le suivant :

- **Cas 1, égale importance des phases :** Les trois phases sont considérées comme aussi importantes avec un poids de $1/3$ pour chacune. Ce cas est un bon compromis lorsqu'aucune des phases n'apporte plus de bénéfices qu'une autre. Plus concrètement, ce cas de figure est de plus en plus présent puisque de nombreuses entreprises se soucient dorénavant de tous les aspects du produit. Prenons l'exemple d'une voiture, il est nécessaire de concevoir un produit le plus aisément assemblable afin d'assurer les cadences de production. La voiture doit également être fiable satisfaire l'utilisateur. Et enfin, les voitures doivent pouvoir être recyclées efficacement afin de satisfaire les exigences des normes sur le taux de recyclage.
- **Cas 1.2, assemblage privilégié :** Dans ce cas de figure, l'assemblage est prépondérant sur les deux autres phases. Cela peut se présenter par exemple pour des produits comme les meubles en kit à assembler. En effet, les fabricants doivent concevoir un produit qui devra être facilement assemblé par des clients qui n'ont pas nécessairement de compétences techniques. Il est donc très important de privilégier la phase d'assemblage par rapport aux autres afin de refléter cet aspect du produit.
- **Cas 1.3, Utilisation privilégiée :** La phase d'utilisation du produit est considérée comme prépondérante dans ce cas-ci. Ce cas peut se présenter sur des produits pour lesquels l'assemblage et le désassemblage ne présente pas de difficultés particulières. Cela est le cas par exemple pour des produits comme des stylos. En effet, ce sont des produits généralement peu complexe et facile d'assemblage, leur recyclage est très peu pris en compte et ils terminent généralement au fond d'une poubelle, autrement dit, incinérés ou mis en décharge.
- **Cas 1.4, Désassemblage privilégié :** Le fait de privilégier est encore très peu répandu car les fabricants pensent d'abord aux autres phases qui sont généralement les plus profitables. Cependant, avec l'ajout de nouvelles normes environnementales nous sommes

bien forcés de prendre en compte cet aspect. Cela est particulièrement vrai pour les produits contenant des matières toxiques qui devront nécessairement être retiré.

- **Cas 2, 3 et 4 :** Dans ces cas nous étudions les alternatives en ne prenant en compte qu'un seul aspect du cycle de vie, respectivement l'assemblage, l'utilisation et le désassemblage pour les 2, 3 et 4. Ces cas sont utiles afin de voir les points forts et les points faibles de chaque alternative sur un aspect précis. En analysant ces résultats il est possible de mieux comprendre les résultats des cas précédents et donc de s'orienter vers la meilleure alternative.

Dans le premier cas, toutes les phases du cycle de vie sont prises en compte avec des importances plus ou moins grandes. Dans les cas suivants, les alternatives ont été évaluées en ne prenant en compte qu'une des trois phases à la fois.

Tableau 4.1 : Résultats pour la première situation

Résultats	Cas 1: Assembl, Util, Désassembl		
	Poids	Normaux	Idéaux
Vis-écrou	Assemblage	0,1215	49,41
Vis	0,3333	0,1534	62,38
Rivets	Utilisation	0,1308	53,19
Cantilever	0,3333	0,2459	100,00
Soudage	Désassemblage	0,1907	77,55
Colle	0,3334	0,1576	64,09
Cas 1.2: Assembl, Util, Désassembl			
	Poids	Normaux	Idéaux
Assemblage		0,1018	39,69
0,8182		0,1408	54,89
Utilisation		0,1205	46,98
0,0909		0,2565	100,00
Désassemblage		0,1802	70,25
0,0909		0,2002	78,05
Cas 1.3: Assembl, Util, Désassembl			
	Poids	Normaux	Idéaux
Assemblage		0,1044	38,93
0,0909		0,1265	47,17
Utilisation		0,1408	52,50
0,8182		0,2682	100,00
Désassemblage		0,2272	84,71
0,0909		0,1328	49,52
Cas 1.4: Assembl, Util, Désassembl			
	Poids	Normaux	Idéaux
Assemblage		0,1639	77,49
0,0909		0,1987	93,95
Utilisation		0,1295	61,23
0,0909		0,2115	100,00
Désassemblage		0,1618	76,50
0,8182		0,1346	63,64

Cas 2: Assemblage		
Poids	Normaux	Idéaux
Assemblage	0,095	36,37
1	0,1365	52,26
Utilisation	0,1164	44,56
0	0,2612	100,00
Désassemblage	0,1768	67,69
0	0,2142	82,01
Cas 3: Utilisation		
Poids	Normaux	Idéaux
Assemblage	0,0997	35,22
0	0,1039	36,70
Utilisation	0,1507	53,23
1	0,2692	95,09
Désassemblage	0,2831	100,00
0	0,0933	32,96
Cas 4: Désassemblage		
Poids	Normaux	Idéaux
Assemblage	0,2495	86,48
0	0,2885	100,00
Utilisation	0,1464	50,75
0	0,127	44,02
Désassemblage	0,101	35,01
1	0,0875	30,33

La colonne intitulée Normaux, correspond aux résultats donnés en sortie de la méthode ANP qui ont ensuite été normalisés (division du résultat d'une alternative par la somme de tous les résultats). La colonne nommée Idéaux permet une lecture plus claire des résultats. L'alternative recevant le meilleur résultat est considéré comme idéale (100%), les autres sont données en pourcentage de cette alternative idéale. Nous allons maintenant détailler les cas et les résultats associés.

- **Cas 1, égale importance des phases :** Les phases du cycle de vie ont été considérées avec la même importance dans ce cas. L'alternative avec les clips cantilever apparaît comme la mieux adaptée pour répondre aux exigences. En effet, elle présente un assemblage particulièrement facile et rapide, de plus le désassemblage n'est pas pénalisé par le fait que les pièces soient endommagées et reste aisément réalisable. Viennent ensuite les alternatives soudé et collé qui présentent des temps d'assemblage et de désassemblage faibles. Avec la fin de vie choisie pour les pièces, le désassemblage ne pose pas de problème et est même le plus rapide. Ces attachements considérés comme permanents sont donc bien adaptés pour des pièces qui ne doivent pas être désassemblées sans dommages. Les trois alternatives utilisant des attachements discrets arrivent ensuite. Elles sont principalement pénalisées par des temps de d'assemblage et de désassemblage plus important que les autres alternatives qui s'expliquent par le fait que le nombre de pièces nécessaires à l'assemblage est plus important. L'espace nécessaire est forcément plus important, ce qui influence également l'aspect du produit.

- **Cas 1.2, assemblage privilégié :** Dans ce second cas de figure, l'assemblage a été considéré comme beaucoup plus important que les deux autres phases. Les clips cantilever sont toujours donnés comme la meilleure alternative. Les attachements solidaires présentent des caractéristiques très intéressantes en termes d'assemblage, le résultat n'est donc pas surprenant. L'alternative utilisant une colle arrive en seconde position devant la solution avec un soudage des pièces. La tendance s'est inversée entre ces deux alternatives. Les attachements soudés ont comme principal inconvénient par rapport aux assemblages collés de nécessiter des outils plus perfectionnés qui demandent une certaine qualification des ouvriers. En privilégiant l'assemblage il est donc logique que l'alternative utilisant une colle soit considérée comme plus intéressante. Les attachements discrets viennent en fin de classement pour les raisons citées plus haut.

- **Cas 1.3, utilisation privilégiée :** Cette fois, la phase d'utilisation est considérée comme la plus importante. Les caractéristiques qui vont principalement rentrer en ligne de compte concernent l'aspect du produit et sa fiabilité. Pour les assemblages collés, l'aspect est bon étant donné que les colles sont presque invisibles, par contre la fiabilité peut être réduite

par les conditions d'utilisation car les colles supportent moins bien les variations de température ou d'humidité. Cela explique le score assez faible obtenu. Les attachements solidaires sont très bons en ce qui concerne ces caractéristiques, tout comme les attachements de type soudure qui sont très fiables. Enfin nous pouvons remarquer que les rivets sont les plus intéressants des attachements discrets car ils offrent un meilleur aspect que des vis et des écrous avec une fiabilité similaire. Les paramètres pris en compte dans la méthode pour cette phase du cycle de vie sont peu nombreux et nous abordons les problèmes d'un point de vue assez global. Pour être plus précis, il serait nécessaire de rajouter des paramètres prenant en compte les problèmes spécifiques à chaque produit afin d'évaluer plus efficacement les avantages et les inconvénients d'une alternative.

- **Cas 1.4, désassemblage privilégié :** La première observation que nous pouvons faire est que les attachements discrets sont nettement plus intéressants dans cette situation que dans les précédentes. L'alternative utilisant des vis est quasiment aussi intéressante que l'alternative avec les clips cantilever. Les rivets sont pénalisés par rapport aux vis par la complexité du désassemblage qui est plus élevée et le système vis écrou, à cause du fait qu'il demande d'avantage de pièces est moins intéressant en termes de désassemblage. Les attachements permanents (colles, soudures...) conservent un intérêt même dans ce cas de figure car le désassemblage est aisément réalisable sans pertes importantes.

Dans les cas suivants nous allons voir les phases du cycle de vie séparément pour bien mettre en avant les avantages de chaque type d'attachement durant une étape donnée.

- **Cas 2, assemblage :** Lorsque seulement les problèmes liés à l'assemblage sont pris en compte, nous pouvons relever que les attachements solidaires sont le meilleur choix. En effet, le nombre de pièces est réduit au minimum, l'assemblage est aisé et rapide. Même si une géométrie spécifique parfois complexe est nécessaire, ce qui rend plus difficile les tests et les modifications, ces attachements sont particulièrement intéressants et permettent de réduire significativement le temps de désassemblage. Les colles

représentent également un choix intéressant grâce à leur flexibilité et le nombre de pièces nécessaires. Les assemblages soudés restent un bon compromis car ils ne requièrent pas de pièces supplémentaires ni de géométrie complexe. Les outils nécessaires peuvent toutefois être un problème et limiter leur utilisation. Enfin les attachements discrets sont nettement moins intéressants à cause du nombre de pièces, de l'espace nécessaire. Cependant la standardisation des vis, écrous et autres en fait des attachements faciles d'utilisation et qui répondent aux exigences de la majorité des assemblages.

- **Cas 3, Utilisation :** Dans ce cas de figure, les assemblages soudés apparaissent comme la meilleure alternative. En effet, ils présentent de très bonnes caractéristiques en matière de fiabilité et d'apparence. C'est également le cas pour les attachements solidaires. Les assemblages collés sont fortement pénalisés par leur faible capacité à résister à différents milieux, ce qui limite leur intérêt et leur utilisation. Enfin les attachements discrets sont handicapés par le nombre d'attachements et donc l'espace nécessaire pour ceux-ci dans le produit qui le rendent moins attrayants et d'avantage sujets à des problèmes de corrosion ou de déformation.
- **Cas 4, Désassemblage :** La phase de désassemblage est un des points forts des attachements discrets. En effet nous pouvons remarquer qu'ils sont nettement plus intéressants que les autres alternatives dans ce cas de figure. Leur aspect discret leur permet d'être retirés des assemblages avec un minimum de dommages, et même si le temps de désassemblage peut être long si le nombre d'attachements est important, la possibilité de récupérer les pièces intactes est souvent intéressante. Si le temps de désassemblage est considéré comme trop important pour assurer la rentabilité, il est toujours possible de se tourner vers un désassemblage semi-destructif qui va permettre de le réduire. Les autres types d'attachements limitent, voire empêchent le démontage sans dommages et requièrent bien souvent des outils plus perfectionnés. Dès qu'il sera question de maintenance, ces attachements seront problématiques et il faudra se tourner vers des assemblages vissés par exemple.

- **Résumé des résultats :** Pour cette première situation il apparaît assez clairement que l'alternative utilisant les clips cantilever est la plus adaptée. En effet, elle présente de nombreux avantages et peu d'inconvénients. L'assemblage est des plus simples et des plus rapides, les attachements sont bien intégrés aux pièces réduisant ainsi l'espace nécessaire tout en assurant une bonne fiabilité. Enfin, même sur le plan du désassemblage, cette alternative est encore intéressante et le désassemblage ne pose pas de problèmes particuliers ni de pertes qui pourraient nuire à ce bilan. Le choix du concepteur devrait donc logiquement se tourner vers cette alternative.

4.1.4 Deuxième situation : Récupération des pièces

Dans cette situation nous considérerons que les pièces ont une valeur importante et peuvent être réutilisée contrairement à la première situation où la récupération intacte des pièces n'engendrait aucun bénéfice supplémentaire (revente ou réutilisation peu intéressante en comparaison du recyclage des matériaux). Nous prendrons un rapport de 10 entre la valeur des pièces et la valeur des matériaux, les deux pièces ont une valeur similaire. Les choix retenus pour obtenir les complexités d'assemblage et de désassemblage sont les mêmes que pour la première situation, seulement le calcul des pertes est différent du fait du changement de la fin de vie des pièces. Le détail est donné en annexe 3. Pour les alternatives vis-écrou et vis, le résultat est identique car le désassemblage ne génère aucune perte, la valeur récupérée sera donc maximale dans leur cas. Pour l'assemblage riveté, les pièces ne sont pas endommagées non plus lors du désassemblage semi destructif, cela correspond donc au cas 3 : Récupération des pièces, pièces intactes. En ce qui concerne l'assemblage utilisant les clips cantilever, le cas est intéressant car les deux pièces ne sont pas affectées de la même manière par le désassemblage. En effet, les opérations de désassemblage consistent à déformer les clips qui sont présents sur la pièce mâle. Cette pièce ne pourra par conséquent pas être réutilisée une fois désassemblée et nous pourrons seulement considérer une revalorisation des matériaux. Par contre pour la pièce femelle, le désassemblage n'entraîne aucune dégradation. Ce cas de figure correspond au cas 5 : Récupération partielle des pièces et récupération des matériaux. Enfin, en ce qui concerne les assemblages soudés et collés, le cas est identique car les pièces sont partiellement détruites lors

du tronçonnage et ne pourrons donc pas être réutilisées. Cependant contrairement à la situation précédente, les pertes ne sont plus de quelques pourcents mais de près de 90%. En effet, les matériaux étant dix fois moins intéressants que les pièces à la revente, le fait de ne pas pouvoir récupérer les pièces est handicapant.

Les nouvelles pertes de valeurs obtenues nous ont permises d'apporter les corrections nécessaires aux scores obtenus. Les tableaux de calcul des complexités de désassemblage sont donnés en annexe 4. Nous avons ensuite recalculé les résultats finaux avec ces nouvelles données. Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant.

Tableau 4.2 : Résultats pour la deuxième situation

Résultats	Cas 1: Assembl, Util, Désassembl		
	Poids	Normaux	Idéaux
Vis-écrou	Assemblage	0,1239	50,78
Vis	0,3333	0,1563	64,06
Rivets	Utilisation	0,1335	54,71
Cantilever	0,3333	0,244	100,00
Soudage	Désassemblage	0,1877	76,93
Colle	0,3334	0,1546	63,36
Cas 1.2: Assembl, Util, Désassembl			
	Poids	Normaux	Idéaux
Assemblage	0,1025		40,04
0,8182	0,1415		55,27
Utilisation	0,1212		47,34
0,0909	0,256		100,00
Désassemblage	0,1795		70,12
0,0909	0,1994		77,89
Cas 1.3: Assembl, Util, Désassembl			
	Poids	Normaux	Idéaux
Assemblage	0,105		39,21
0,0909	0,1273		47,54
Utilisation	0,1414		52,80
0,8182	0,2678		100,00
Désassemblage	0,2265		84,58
0,0909	0,132		49,29
Cas 1.4: Assembl, Util, Désassembl			
	Poids	Normaux	Idéaux
Assemblage	0,1699		82,16
0,0909	0,2065		99,85
Utilisation	0,1366		66,05
0,0909	0,2068		100,00
Désassemblage	0,1537		74,32
0,8182	0,1264		61,12
Cas 2: Assemblage			
Poids	Normaux	Idéaux	
Assemblage	0,095		36,37
1	0,1365		52,26
Utilisation	0,1164		44,56
0	0,2612		100,00
Désassemblage	0,1768		67,69
0	0,2142		82,01
Cas 3: Utilisation			
Poids	Normaux	Idéaux	
Assemblage	0,0997		35,22
0	0,1039		36,70
Utilisation	0,1507		53,23
1	0,2692		95,09
Désassemblage	0,2831		100,00
0	0,0933		32,96
Cas 4: Désassemblage			
Poids	Normaux	Idéaux	
Assemblage	0,2634		85,99
0	0,3063		100,00
Utilisation	0,1628		53,15
0	0,1167		38,10
Désassemblage	0,0822		26,84
1	0,0687		22,43

En comparant ces résultats avec les résultats obtenus précédemment nous pouvons tout d'abord remarquer que les écarts pour les cas 1, 1.2 et 1.3 sont assez faibles, de l'ordre de 1 à 2%. Dans ces cas le désassemblage n'est pas l'aspect prépondérant ce qui explique ces faibles variations, en particulier pour les cas 1.2 et 1.3 où le désassemblage est considéré comme largement moins important que l'assemblage où l'utilisation. Pour les cas 2 et 3 il est normal de

ne retrouver aucune modification car le désassemblage n'est absolument pas pris en compte. Les deux cas restants sont les plus intéressants à analyser.

Dans le cas 1.4 où le désassemblage est considéré comme largement plus important que les deux autres phases, les variations pour une alternative vont jusqu'à près de 6% et lorsque seulement le désassemblage est pris en compte les variations atteignent les 8%. Nous pouvons également remarquer que les alternatives qui permettent de récupérer les pièces sans dommage obtiennent un score plus élevé que précédemment, à l'inverse des alternatives occasionnant des pertes importantes qui voient leur score diminuer. Avec ces nouveaux résultats, le choix final peut être différent de celui fait pour la première situation. En effet, dans la première situation les clips cantilever apparaissaient comme le meilleur choix. Dans la deuxième situation, ils représentent toujours l'attachement idéal mais l'écart avec l'alternative utilisant les vis est extrêmement faible. Étant donné cet écart, il est intéressant de regarder les cas 2, 3 et 4 pour avoir une idée plus précise sur les différentes alternatives. Suivant les objectifs du fabricant le choix peut se tourner vers l'une ou l'autre des deux alternatives. Les cas 2 et 3 nous montrent bien que les clips cantilever sont très intéressants en assemblage et lors de l'utilisation, cependant en observant le cas 4, nous pouvons voir qu'ils sont nettement moins efficaces dans le domaine du désassemblage. Si le fabricant privilégie un produit qui assurera un désassemblage aisé et intéressant financièrement, alors il sera plus intéressant pour lui d'opter pour un assemblage vissé. Et inversement si l'assemblage est primordial. Il faut toutefois noter que les résultats obtenus ne sont pas absolus, ils doivent être considérés comme une aide pour réaliser un choix.

4.2 Deuxième cas d'application

Nous allons maintenant nous intéresser à un second exemple plus concret qui consiste en l'assemblage d'un circuit imprimé dans le boîtier qui sert de support. L'intérêt de cet exemple réside dans le fait que nous allons devoir adapter le modèle à ce nouveaux cas afin de mieux prendre en compte certains aspects de cet assemblage. Le modèle qui a été utilisé dans le premier cas d'application est un modèle très général que l'on peut utiliser pour des cas simples qui ne présentent pas de spécificités particulières. Cependant, dès lors que l'on souhaite étudier un cas plus complexe (alternatives d'attachements non standard, conditions d'utilisation particulières...), il est nécessaire d'apporter des modifications à certaines comparaisons faites

dans la méthode ANP. Ces modifications vont permettre de refléter au mieux les problèmes liés au produit et ainsi de fournir des résultats plus justes. Par le biais de ce deuxième cas nous allons pouvoir appliquer cette démarche et mettre en avant le fait que la méthode de choix présentée dans ce mémoire est capable de s'adapter suivant le produit étudié.

Pour ce qui est de la fin de vie envisagée pour les pièces, le boîtier et le circuit imprimé seront récupérés dans le but de revaloriser les matériaux. La constante évolution des produits électroniques rend difficile la réutilisation du circuit imprimé. Il conserve cependant une valeur importante car il contient des métaux précieux.

Le circuit imprimé est rectangulaire et sera fixé au niveau des angles. Quatre alternatives ont été envisagées pour réaliser cet assemblage. Les alternatives et les détails des choix et calculs des temps d'assemblage et de désassemblage sont détaillés dans la partie suivante, puis nous verrons les résultats obtenus et les modifications possibles.

4.2.1 Les alternatives d'attachements envisagées

Les quatre alternatives représentent trois des grands types d'attachements pris en compte, les attachements discrets, les attachements solidaires et les liaisons adhésives. Un assemblage soudé n'était pas pertinent dans ce cas d'étude et ne sera donc pas pris en considération. Plus précisément les alternatives sont les suivantes :

- **Assemblage vissé : Fixation par 4 vis M3 à tête fraisée plate cruciforme**

Le circuit est imprimé est fixé au niveau des angles par les vis qui sont mises en position à l'aide d'une visseuse électrique. Le temps d'assemblage a été estimé à 49,18 secondes, toujours à l'aide de la méthode de Boothroyd. Le temps d'assemblage peut sembler long car il comprend les temps de manipulation et d'insertion de chaque pièce (boîtier, circuit imprimé et vis). Même si le temps est quelque peu surestimé ce n'est pas un problème car tous les temps d'assemblage sont évalués suivant la même méthode et nous voulons en définitive obtenir une comparaison entre les temps des différentes alternatives. La surestimation de tous les temps d'assemblage n'engendrera donc pas de variations notables sur le résultat final. Dans un premier temps nous envisagerons un désassemblage non destructif du circuit imprimé, le temps de désassemblage est alors d'environ 45 secondes car les risques d'endommagement des vis sont faibles et elles seront majoritairement

en bon état à la fin de la phase d'utilisation. La direction d'assemblage est la même pour l'assemblage et le désassemblage et se fait par le dessus. Le score pour la force requise au désassemblage est évalué à 29 sur une échelle de 0 à 100. Enfin aucun équipement de protection ni aucune formation particulière ne sont requis.

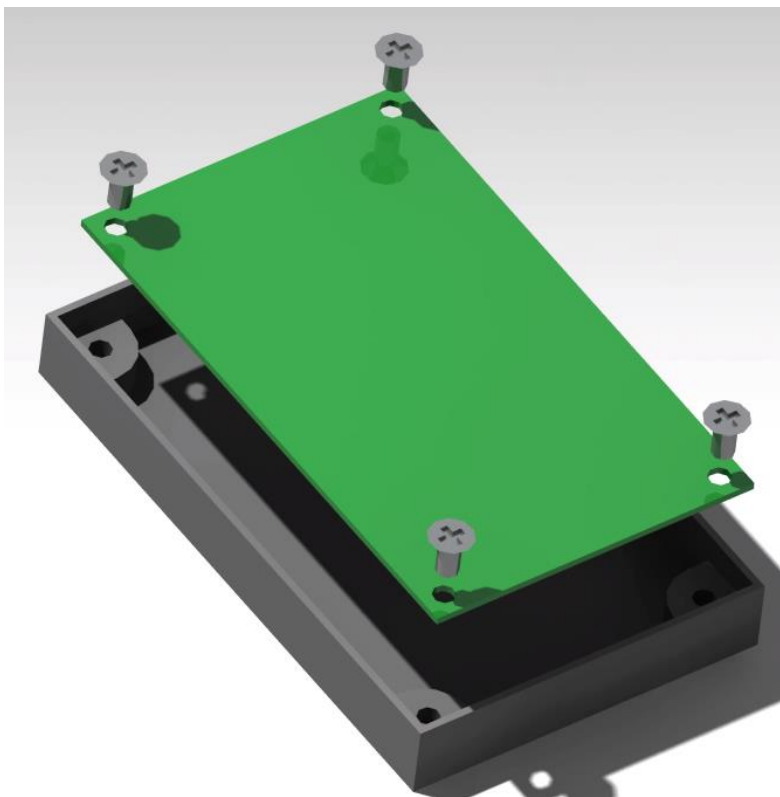


Figure 4.4 : Vue éclatée de l'assemblage vissé

- Assemblage riveté : fixation à l'aide de 4 rivets aveugles en plastique

Cette alternative est similaire à l'alternative précédente en remplaçant les vis par des rivets. Le temps d'assemblage estimé est d'ailleurs le même soit 49,18 secondes. Les rivets sont mis en position à l'aide d'une pince à riveter et l'accès se fait toujours par le dessus du produit. En ce qui concerne le désassemblage, nous avons retenu un désassemblage semi destructif qui consiste à percer les rivets pour libérer les liaisons d'assemblage. Le temps estimé avec la méthode BasicMOST pour réaliser ces opérations de désassemblage est de 13,32 secondes. La résistance des rivets en plastiques est considérée comme modérée. Enfin, pour ce qui est des équipements et

des qualifications des ouvriers, des gants sont requis et pour les opérations de désassemblage l'opérateur sera rapidement informé de la démarche à suivre.

- **Assemblage emboité : fixation à l'aide de 4 supports à clipper**

Étant donné les contraintes à respecter et le fait que le boîtier sert de support à d'autres pièces, il est difficile d'intégrer directement les attachements au support. Nous avons donc utilisé une pièce intermédiaire qui s'emboîte au support et sur laquelle le circuit imprimé vient se fixer par la suite. La forme de cette pièce de fixation est donnée dans la figure suivante.

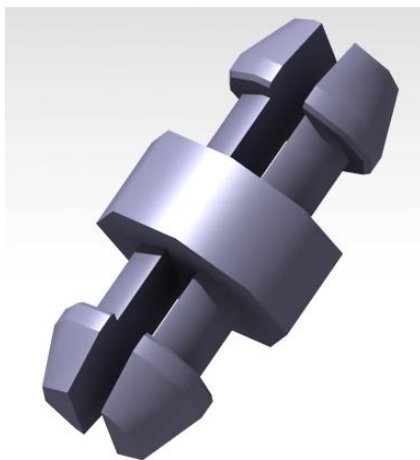


Figure 4.5 : Pièce intermédiaire de fixation

Le temps d'assemblage estimé pour cette alternative est de 24,12 secondes et les opérations à effectuer ne nécessitent aucun outil. L'accès à la zone de travail se fait toujours par le dessus de la pièce. Pour ce qui est du désassemblage, l'angle de rétention des clips est trop important pour pouvoir récupérer le circuit imprimé sans endommager une partie. Nous avons donc choisi de découper la plaque en époxy du circuit imprimé autour des attachements afin de le récupérer. Une pince coupante est utilisée pour réaliser les deux incisions au niveau de chaque angle. A l'aide de la méthode BasicMOST nous avons pu estimer le temps de désassemblage à 14,76 secondes.

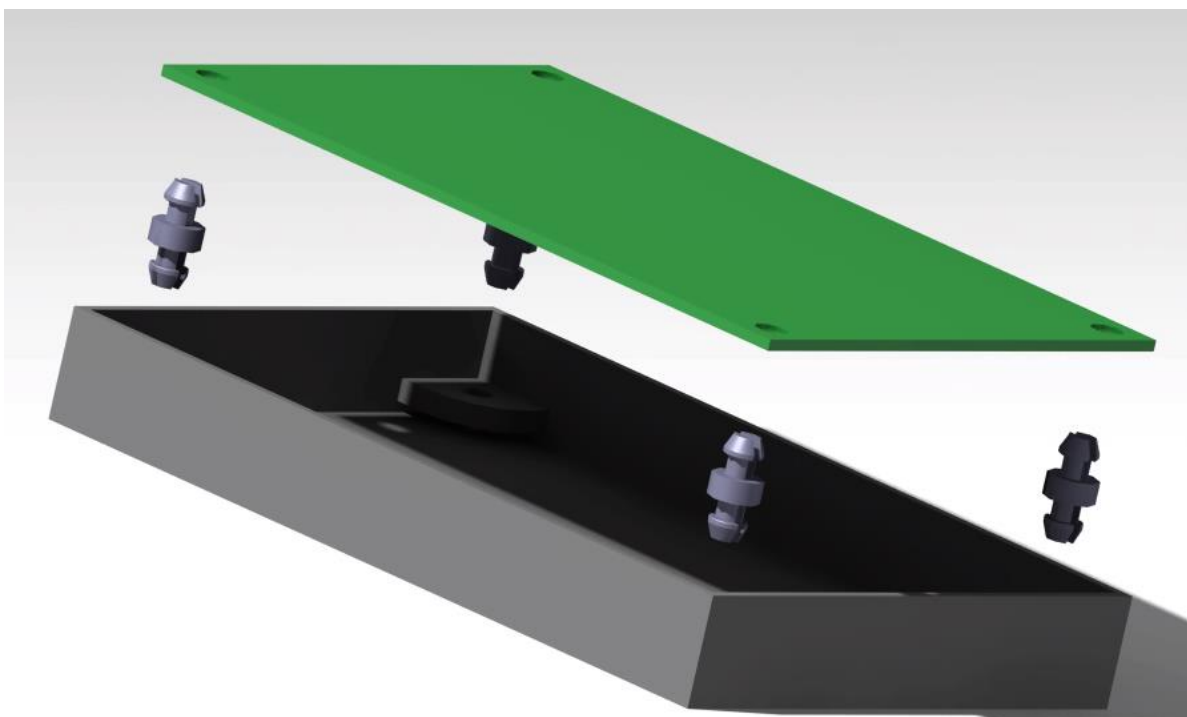


Figure 4.6 : Vue éclatée de l'assemblage emboité

- Assemblage collé

Pour cette quatrième alternative, la liaison est réalisée à l'aide d'une colle adaptée aux matériaux présents. Le temps d'assemblage a été estimé à 22,9 secondes et les opérations nécessitent une rapide formation des opérateurs afin d'assurer la qualité de la fixation. Ce type d'assemblage est considéré comme un assemblage permanent, nous n'avons pas le choix d'envisager un désassemblage semi destructif. La démarche utilisée est la même que celle utilisé pour l'assemblage emboité à savoir la découpe de la plaque en époxy qui conduit à un temps de désassemblage de 14,76 secondes.

Maintenant que les différentes alternatives ont été définies et les paramètres permettant de calculer les complexités d'assemblage et de désassemblage explicitées (les tableaux de calcul sont donnés en annexe 4), nous allons nous intéresser à la méthode ANP.

4.2.2 Les modifications apportées à la méthode ANP

Le modèle que nous avons utilisé dans le premier cas d'application pourrait être réutilisé directement, cependant il est intéressant d'apporter certaines modifications au sein de certaines parties de la méthode ANP afin d'être plus fidèle au cas étudié et donc fournir des résultats plus en accord avec les exigences. Nous allons donc apporter des corrections à certaines des comparaisons faites. Ces modifications ne sont valables que pour ce cas précis, pour chaque nouveau cas d'étude il peut être nécessaire d'effectuer des modifications similaires afin de mieux représenter le problème et les contraintes spécifiques à l'assemblage étudié.

Le premier point qu'il convient de modifier concerne le paramètre, « Nombre d'éléments d'attachements ». En effet dans le modèle de base nous avons considéré que les attachements solidaires étaient plus intéressants sur ce point que les autres types d'attachements grâce à leur implantation directe. Cependant, dans le cas que nous étudions, il est nécessaire d'apporter des pièces supplémentaires dans le cas de l'assemblage clippé. Le nombre de pièces est donc le même que pour les assemblages rivetés ou vissés. Le nombre d'étapes nécessaires pour réaliser l'assemblage est donc également plus élevé. Par contre l'utilisation d'une pièce de fixation intermédiaire apporte beaucoup plus de flexibilité à l'assemblage. En effet, ce type de fixation est standard et facilement modifiable contrairement à un attachement qui appartient aux pièces à assembler et qui demandera une modification importante de celle-ci en cas de changement. Le coût des modifications et la facilité à réaliser des tests sont donc nettement améliorés avec une solution comme celle retenue.

Le second point important à prendre en compte, concerne les paramètres liés à la phase d'utilisation du produit. Nous n'avons apporté aucun changement aux paramètres 'Fiabilité de l'attachement' et 'Supporter différents environnements' car bien qu'il s'agisse d'un produit électronique, il reste susceptible d'être exposé à des variations de températures et d'humidité qui pourraient nuire à l'intégrité de l'attachement et en particulier des liaisons adhésives. Par contre en ce qui concerne l'apparence du produit, le choix de tel ou tel attachement pour la fixation du circuit imprimé ne modifie en rien l'apparence car ils sont à l'intérieur du produit et totalement invisibles pour l'utilisateur. Nous avons donc décidé de mettre les différentes alternatives sur un pied d'égalité sur ce point.

Enfin, au niveau des paramètres liés au désassemblage nous avons apporté quelques modifications. La fin de vie envisagée étant une revalorisation des matériaux, et les différentes démarches de désassemblage conduisant à un bilan quasiment identique en terme de récupération de matériaux, nous avons modifié les comparaisons faites pour la facilité de revente des pièces afin de réduire les différences qui existaient. Initialement les alternatives avec des attachements discrets étaient considérées comme plus intéressantes car elles permettent une récupération et une réutilisation aisée des pièces contrairement à des pièces collées ou soudées entre elles. Le dernier point modifié concerne le risque d'endommagement lors du désassemblage. Dans la situation que nous étudions, récupérer les pièces intactes ne présente pas de réel intérêt, les alternatives ont donc été évaluées comme d'égale importance sur ce point.

4.2.3 Les résultats obtenus

Toutes les parties nécessaires à l'application de la méthode ont été définies, nous pouvons lancer les calculs finaux. Comme pour le premier cas d'application nous allons étudier plusieurs cas de figure en faisant varier l'importance donnée à chacune des phases du cycle de vie du produit. Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant.

Tableau 4.3 : Résultats obtenus pour l'assemblage du circuit imprimé

Résultats	Cas 1: Assembl, Util, Désassembl		
	Poids	Normaux	Idéaux
Vis	Assemblage	0,2183	75,51
Rivets	0,3333	0,2089	72,26
Clips	Utilisation	0,2891	100,00
Colle	0,3333	0,2837	98,13
	Désassemblage		
	0,3334		
	Cas 1.2: Assembl, Util, Désassembl		
	Poids	Normaux	Idéaux
	Assemblage	0,198	55,31
	0,8182	0,181	50,56
	Utilisation	0,263	73,46
	0,0909	0,358	100,00
	Désassemblage		
	0,0909		
	Cas 1.3: Assembl, Util, Désassembl		
	Poids	Normaux	Idéaux
	Assemblage	0,2173	62,73
	0,0909	0,2118	61,14
	Utilisation	0,3464	100,00
	0,8182	0,2245	64,81
	Désassemblage		
0,0909			
	Cas 1.4: Assembl, Util, Désassembl		
	Poids	Normaux	Idéaux
	Assemblage	0,2422	91,29
	0,0909	0,2367	89,22
	Utilisation	0,2558	96,42
	0,0909	0,2653	100,00
	Désassemblage		
	0,8182		
	Cas 2: Assemblage		
	Poids	Normaux	Idéaux
	Assemblage	0,1908	49,74
	1	0,1711	44,60
	Utilisation	0,2545	66,35
	0	0,3836	100,00
	Désassemblage		
0			
	Cas 3: Utilisation		
	Poids	Normaux	Idéaux
	Assemblage	0,2238	52,19
	0	0,2238	52,19
	Utilisation	0,4288	100,00
	1	0,1235	28,80
	Désassemblage		
	0		
	Cas 4: Désassemblage		
	Poids	Normaux	Idéaux
	Assemblage	0,2814	91,33
	0	0,3081	100,00
	Utilisation	0,2053	66,63
	0	0,2053	66,63
	Désassemblage		
1			

Les premières observations que nous pouvons faire concernent les cas 2 (assemblage uniquement), 3 (utilisation uniquement) et 4 (désassemblage uniquement) qui sont les cas dans lesquels les phases du cycle de vie sont analysées séparément. Un fait intéressant concerne le résultat du cas 2. En effet nous pouvons voir que contrairement au cas général présenté dans la partie précédente, l'alternative utilisant des attachements solidaires n'est plus la plus intéressante. Le fait d'avoir augmenté le nombre de pièces en utilisant des clips de fixation externes aux pièces

rend les attachements solidaires moins performants en assemblage au profit des assemblages collés. Ensuite, concernant la phase d'utilisation les résultats sont assez proches de ceux trouvés dans le cas général sauf pour l'assemblage vissé. Ne pas prendre en compte l'apparence dans les calculs leur permet de mieux paraître. Ils restent cependant encore nettement moins intéressants que les attachements solidaires. Enfin, pour ce qui est du désassemblage, nous pouvons observer que le résultat est bien plus homogène que pour le cas général. Le fait d'avoir une fin de vie similaire où la récupération des pièces sans dommages ne rentre pas en ligne de compte permet de rendre bien plus attrayant des assemblages considérés comme permanents. L'assemblage riveté se place en première position essentiellement car les rivets assurent un désassemblage rapide et simple. L'assemblage est légèrement en retrait, toutefois il est important de noter que si nous modifions la technique de désassemblage afin de réduire le temps de désassemblage, l'écart entre les deux alternatives sera plus faible (perçage des vis comme pour les rivets ou découpe de la plaque en époxy au lieu de la dévisser).

Les autres cas sont une composition des trois cas que nous venons de détailler. Le constat que nous pouvons faire est que plus l'assemblage prend une place importante dans le choix de l'attachement et plus la liaison adhésive apparaît comme la plus appropriée. Ce constat est à mitiger si le produit est susceptible d'être soumis à différents environnements. La liaison adhésive sera bien moins performante et des problèmes de fiabilité peuvent survenir. Dans ce cas, utiliser les clips est une bonne solution car ils restent performants en assemblage et ne rencontrent pas de problèmes liés au milieu d'utilisation. Enfin, si le produit est développé avec pour objectif principal de garantir un désassemblage aisé il faudra se tourner vers les alternatives utilisant des rivets ou des vis.

4.2.4 Discussion sur le fonctionnement de la méthode et les résultats obtenus

Par le biais de ces deux exemples nous avons pu voir comment mettre en application cette méthode de choix des attachements en détaillant les différentes étapes qui doivent être réalisées pour parvenir aux résultats. Dans cette partie nous allons mettre en avant les points forts de la méthode mais également ses limites et les erreurs qui peuvent être commises lors de son utilisation ou lors de l'exploitation des résultats.

Nous avons essayé de prendre en compte un maximum de paramètres reflétant les différents problèmes liés à l'assemblage, à l'utilisation ou au désassemblage d'un produit. La méthode est encore loin d'être exhaustive mais elle apporte des éléments nouveaux qui ont été très peu traités comme le désassemblage semi destructif par exemple. Les problèmes de coûts sont assez peu abordés par notre méthode, tout comme les contraintes liées aux propriétés mécaniques et physiques qui sont laissées à la charge du concepteur (chaque type d'attachement dispose de propriétés différentes en terme de résistance, d'amortissement, de poids... et cela peut être un critère important dans le choix d'un attachement). Concernant les coûts, il est vrai que les résultats obtenus peuvent potentiellement mettre en avant une alternative d'attachement qui demandera un trop gros investissement financier pour être mise en place (modification des lignes d'assemblage, formation des ouvriers...). Cependant, les fabricants doivent être prêts à faire des concessions et ne pas toujours opter pour l'alternative leur assurant le meilleur bilan financier. L'enjeu va au-delà d'une simple considération financière.

Le second point que nous allons aborder concerne la difficulté d'utilisation de la méthode. Comme nous l'avons présenté précédemment il est important pour une telle méthode de choix d'être suffisamment simple d'utilisation pour devenir un outil efficace au service des concepteurs et non un ensemble trop complexe et trop fastidieux qui requiert des heures de réflexion pour parvenir au premier résultat et qui forcément ne sera pas efficace lors des phases de conception préliminaire durant lesquelles il est nécessaire de pouvoir obtenir des réponses rapidement pour faire le bon choix au plus vite. Sur ce point, la méthode que nous présentons n'est pas encore exemplaire. En effet, malgré le fait que nous ayons mis en place des éléments facilitant son utilisation (modèles prédéfinis d'attachements, complexités d'assemblage et de désassemblage limitant les paramètres présents dans la méthode ANP...), la détermination des différentes données nécessaires demande un temps relativement important et qui s'accroîtra avec la complexité de l'assemblage étudié. Toutes les étapes de calcul des temps d'assemblage et de désassemblage, de remplissage des tableaux de calcul des complexités, d'estimation des pertes de valeur... qui doivent être effectuées au préalable sont les étapes les plus longues. Une fois qu'elles ont été réalisées pour un assemblage, il est par contre facile d'apporter des modifications afin d'étudier différentes possibilités (modifications du poids des groupes, des modèles d'attachements, des complexités...). Étant donné la durée de mise en place de la méthode, elle ne

doit pas être utilisée pour chaque cas qui se présente. En effet, de nombreux cas ne requièrent pas une étude aussi approfondie pour parvenir à un choix cohérent. Des contraintes liées à l'espace disponible, la résistance mécanique, la maintenance limitent déjà considérablement les choix possibles pour réaliser un assemblage. Dès lors que des opérations de maintenance sont prévues pour un produit, les attachements considérés comme permanents (Soudure, liaisons adhésives...) ne seront pas des alternatives à envisager. L'utilisation de cette méthode doit donc se faire sur des assemblages pour lesquels le choix est difficile à cause d'un nombre important de possibilités ou lorsque le choix de tel ou tel attachement représente un point clé pour le produit.

Enfin, le dernier point que nous allons aborder concerne les limites de la méthode. Commençons tout d'abord par la méthode ANP qui est la base de notre méthode. C'est un outil très puissant qui peut, lorsqu'il est correctement utilisé, fournir des informations précieuses. Cependant, avec cette méthode il est facile d'obtenir des résultats totalement incohérents. Le système de comparaison deux à deux des paramètres sur lequel repose la méthode ANP est efficace à condition de respecter les règles. Modifier certaines parties sans en modifier d'autres qui devraient l'être peut mener à des résultats complètement faussés. Les résultats de cette méthode reposent sur la qualité des comparaisons qui sont faites par l'utilisateur. Ensuite, concernant les limites d'application de la méthode que nous proposons, il est encore difficile de pouvoir l'utiliser pour certains cas. La principale limitation concerne le désassemblage et plus précisément le désassemblage semi destructif qui n'est pas évident à prendre en compte convenablement. En effet, si nous prenons l'exemple du désassemblage du fuselage d'un avion, il est difficile d'évaluer lors de la phase de conception préliminaire quel vont être les pertes de valeurs. Les pièces sont généralement assemblées à l'aide de nombreux rivets qu'il est trop long de désassembler un à un pour assurer la rentabilité du désassemblage. Il est alors intéressant de se tourner vers un désassemblage semi destructif qui consiste à découper les pièces dans le but de séparer au mieux les matériaux. La séparation n'est jamais parfaite et les matériaux récupérés contiennent une portion qui peut être considérée comme un polluant et qui nuit à la qualité du matériau. Parvenir à évaluer des éléments comme celui-ci est difficile et requiert une excellente connaissance du produit et des techniques de désassemblage (ce qui n'est pas toujours le cas lors d'une conception préliminaire).

En résumé, l'utilisation ou non de cette méthode de choix des attachements repose sur différents facteurs. Tout d'abord, il est nécessaire que l'assemblage puisse être réalisé de plusieurs manières différentes et surtout que ces alternatives possibles soient viables et intéressantes (résistance mécanique suffisante, espace suffisant pour les attachements, résistant aux conditions d'utilisation...). Étudier un produit alors qu'une seule alternative est réellement viable est une perte de temps, peu importe les résultats donnés par la méthode, au final le concepteur se tournera forcément vers la seule alternative remplissant le cahier des charges. Ensuite, lorsque plusieurs alternatives viables ont été déterminé, il faut se demander si une alternative n'apparaît pas comme nettement plus intéressante sur tous les points. En effet, si une alternative répond très bien à l'ensemble des critères, aussi efficace en assemblage que lors de l'utilisation et du désassemblage, alors il n'est pas nécessaire de passer par toute une série de calculs qui va finalement nous conduire vers ce résultat. Par contre, si les différentes alternatives présentent des aspects intéressants sur certains points et des lacunes sur d'autres, alors dans ce cas, parvenir à identifier le meilleur compromis est loin d'être évident sans l'utilisation d'une méthode de choix. Enfin, un point important concerne la fin de vie du produit. Nous avons pu voir que le choix de tel ou tel attachement a des conséquences directes sur la fin de vie du produit (possibilité ou non de désassembler sans dommages, réutilisation des pièces possibles ou non...). Cette partie du cycle de vie est encore mal maîtrisé, en particulier le désassemblage semi-destructif, il est donc possible que le concepteur rejette certaines alternatives car elles ne lui semblent pas viables lors du désassemblage. Or, cela peut être tout l'inverse et des attachements permanents peuvent assurer une fin de vie du produit très intéressante grâce à l'utilisation de méthode de désassemblage semi-destructif. Il est alors intéressant d'utiliser la méthode de choix présentée car elle permet d'évaluer les pertes lors du désassemblage quel que soit la méthode de désassemblage utilisée et ainsi de déterminer les solutions engendrant le minimum de pertes.

CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Au fil des différentes parties, nous avons suivi le développement d'une méthode de choix des attachements plus complète que celles ayant déjà pu être présentées dans la littérature, avec notamment, la prise en compte de l'ensemble des phases du cycle de vie d'un produit (assemblage, utilisation et désassemblage), ainsi que la possibilité d'évaluer les alternatives d'attachements en prenant en compte le type de désassemblage effectué. Notre méthode s'appuie sur la méthode de calcul ANP qui a fait ses preuves comme outil d'aide à la prise de décision pour toutes sortes d'application. Afin de ne pas rendre la méthode trop contraignante à utiliser par les concepteurs, nous avons choisi de calculer deux paramètres généraux en amont de la méthode ANP (les complexités d'assemblage et de désassemblage) qui regroupent des paramètres qualitatifs facilement accessibles et précis. Ils ont permis de réduire le nombre de paramètres directement pris en compte afin de réduire le temps nécessaire pour obtenir un résultat.

Par le biais de ces complexités d'assemblage et de désassemblage nous avons également pu introduire le désassemblage semi destructif en créant des cas distincts suivant le type de désassemblage envisagé. Pour prendre en considération les pertes qui sont générées lors d'un désassemblage semi destructif nous avons dû créer un petit outil nous permettant d'évaluer assez simplement le total des pertes de valeurs en pourcentage de la valeur maximale qui aurait pu être récupérée. Les données nécessaires à ce calcul concernent le volume des pièces, les prix de revente des pièces et des matériaux, et sont facilement accessibles même lors des premières phases de conception. Grâce à l'ajout de ces outils dans la méthode de choix des attachements, nous sommes parvenus à la rendre bien plus complète en comparaison d'une méthode s'appuyant uniquement sur la méthode ANP, sans pour autant la rendre plus difficile ou plus lourde d'utilisation.

Deux exemples ont été présentés afin d'illustrer le fonctionnement de la méthode et ses possibilités. Le premier exemple très général nous a permis de mettre en application tous les outils développés pour cette méthode de choix. A savoir les complexités d'assemblage et de désassemblage, le calcul des pertes de valeurs et le programme de calcul final utilisant la méthode ANP. Les résultats obtenus sont tout à fait cohérents et ont mis en avant les attachements solidaires comme des solutions très efficaces pour cet assemblage. Nous avons également pu observer que les attachements discrets tel que les vis étaient également de bonnes

solutions et en particulier lorsqu'un désassemblage sans dommages est souhaité. Le second exemple avait pour but de montrer les possibilités fournies par la méthode pour s'adapter au cas étudié. En effet, pour représenter les spécificités du produit nous avons apporté certaines modifications pour affiner les calculs et obtenir des résultats plus justes.

Les résultats obtenus grâce à notre méthode de choix sont cohérents et peuvent être une aide précieuse pour les concepteurs en leur fournissant des informations sur les différentes alternatives d'attachement étudiées en fonction des phases du cycle de vie privilégiées. Ces exemples nous ont également permis d'évaluer le temps nécessaire à la mise en place de la méthode et sa flexibilité. Concernant le temps nécessaire, nous pouvons dire qu'il dépend beaucoup de l'assemblage étudié mais globalement il reste assez important si une bonne précision est requise. Cependant, une fois toutes les données rentrées il est très facile et rapide d'apporter des modifications afin d'affiner les résultats. De plus, les modèles déjà calculés peuvent servir de base lors de l'étude d'un nouvel assemblage présentant des caractéristiques similaires et ainsi le temps requis pour parvenir au premier résultat est nettement diminué.

Un reproche que nous pourrions faire à cette méthode concerne la faible prise en considération des coûts, ainsi que des problèmes purement techniques (résistance mécanique, amortissement, conductivité thermique et électrique...), qui sont laissés aux bons soins des concepteurs. Il est de leur ressort de déterminer les alternatives qui sont viables et qui sont à même de respecter le cahier des charges. Ces aspects qui ne doivent pas être négligés lors du choix d'un attachement sont toutefois difficiles à rassembler au sein d'une méthode générale. En effet, les contraintes seront totalement différentes d'un produit à un autre et une méthode efficace dans un cas risque d'être mal adaptée dans un autre. Concernant les coûts, ils ne sont pas directement pris en compte dans la méthode mais plutôt intégrés par le biais de certains paramètres. En effet, les paramètres comme les temps d'assemblage et de désassemblage, les outils ou encore le niveau de qualification des ouvriers servent d'indicateurs.

Pour finir sur cette nouvelle méthode, nous pouvons dire qu'elle représente un outil intéressant dans l'optique d'améliorer la performance des assemblages, car elle permet une meilleure compréhension des impacts d'un type d'attachement sur une phase du cycle de vie. En guidant les concepteurs vers le meilleur compromis lorsqu'ils sont face à des décisions difficiles de choix d'attachements, il est alors possible de mettre au point des produits plus efficaces et

surtout qui seront bien moins contraignants une fois leur fin de vie atteinte et qu'ils devront être revalorisés.

BIBLIOGRAPHIE

- Amelia, L., Wahab, D.A., Ismail, A.R. & Che Haron, C.H. (2009). Disassembly time evaluation for enhancing the reusability of automotive components, *In: Proceedings of the 2009 IEEE Industrial Engineering and Engineering Management*, 8-11 December 2009, Hong Kong, 115-119.
- Asmatulu, E., Twomey, J. & Overcash, M. (2013). Evaluation of recycling efforts of efforts of aircraft companies in Wichita. *Ressources, Conservation and Recycling*, 80, 36-45.
- Boothroyd, G. (1986). *Les assemblages : comment optimiser leur conception*. Senlis : Centre technique des industries mécaniques.
- Chen, R.W., Navin-Chandra, D. & Prinz, F.B. (1993). Product design for recyclability: A cost benefit model and its application. *Proceedings of the 1993 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 10-12 May 1993, Arlington, VA, USA (p178-183).
- Chen, K.Z. (2001). Development of integrated design for disassembly and recycling in concurrent engineering. *Integrated Manufacturing Systems*, 12(1), 67-79.
- Chu, C.H.C., Luh, Y.P., Li, T.C. & Chen, H. (2009). Economical green product design based on simplified computer aided product structure variation. *Computers in Industry*, 60, 485-500.
- Cui, J. & Forssberg, E. (2003). Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. *Journal of Hazardous Material*, B99, 243-263.
- Das, S.K., Yedlarajiah, P. & Narendra, R. (2000). An approach for estimating the end-of-life product disassembly effort and cost. *International Journal of Production Research*, 38(3), 657-673.
- De Ron, A. & Penev, K. (1995). Disassembly and recycling of electronic consumer products: an overview. *Technovation*, 15(6), 363-374.
- Duflou, J.R., Seliger, G., Kara, S., Umeda, Y., Ometto, A. & Willems, B. (2008). Efficiency of product disassembly: A case-based study. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57, 583-600.

- Eco-3e, 2013. Guide Eco-conception des éco-organismes DEEE. Consulté le 12 Mars 2014, tiré de <http://eco3e.eu>.
- Ghazilla, R.A.R., Taha, Z., Yusoff, S., Rashid, S.H.A. & Sakundarini, N. (2014). Development of decision support system for fastener selection in product recovery oriented design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(5-8), 1403-1413.
- Güngör, A. & Gupta, S. M. (1999). Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: A survey. *Computers and Industrial Engineering*, 36, 811–853.
- Güngör, A. (2006). Evaluation of connection types in design for disassembly (DFD) using analytic network process. *Computers & Industrial Engineering*, 50, 35-54.
- Ilgin, M.A. & Gupta, S.M. (2010). Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art. *Journal of Environmental Management*, 91, 563-591.
- Kondo, Y., Deguchi, K., Hayashi, Y. & Obata, F. (2003). Reversibility and disassembly time of part connection. *Ressources, Conservation and Recycling*, 38, 175-184.
- Kopacek, P. & Kopacek, B. (2006). Intelligent, flexible disassembly. *International Journal of Production Research*, 30, 554-560.
- Kroll, E. & Hanft, T.A. (1998). Quantitative evaluation of product disassembly for recycling. *Research in Engineering Design*, 10, 1-14.
- Kroll, E. & Carver, B.S. (1999). Disassembly analysis through time estimation and other metrics. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 15(3), 191-200.
- Kuo, T.C., Huang, S.H. & Zhang, H.C. (2001). Design for manufacture and design for X: concepts, applications, and perspectives. *Computers & Industrial Engineering*, 41, 241-260.
- Messler, R.W. (1993). *Joining of Advanced Materials*. Rensselaer Polytechnic Institute, Boston, MA: Butterworth-Heinemann.
- Pak, K.G. & Sodhi, R. (2002). Destructive disassembly of bolts and screws by impact fracture. *Journal of Manufacturing Systems*, 21(4), 316-324.

- Remery, M., Mascle, C. & Agard, B. (2012). A new method for evaluating the best product end-of-life strategy during the early design phase. *Journal of Engineering Design*, 23(6), 419-441.
- Rose, C. M., Ishii, K. & Masui, K. (1998). How product characteristics determine end-of-life strategies. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 4-6 May 1998, Oak Brook, IL, USA (p322-327).
- Saaty, T.L. (1996). *Decision making with dependence and feedback: the analytic network process*. Pittsburgh, PA: RWS Publications.
- Seliger, G., Keil, T., Rebafka, U. & Stenzel, A. (2001). Flexible disassembly tools. *Proceedings of the 2001 IEEE international Symposium on Electronics and the Environment*, 7-9 May 2001, Denver, CO, USA (p30-35).
- Sonnenberg, M. (2001). *Force and effort analysis of unfastening actions in disassembly processes*. (Thèse de doctorat, New Jersey Institute of Technology, New Jersey, USA).
- Sun, L., Huang, W.M., Lu, H.B., Wang, C.C. & Zhang, J.L. (2014). Shape memory technology for active assembly/disassembly: fundamentals, techniques and example applications. *Assembly Automation*, 34(1), 78-93.
- Takeuchi, S., Saitou, K. (2006). Design for optimal end-of-life scenario via product-embedded disassembly. *Proceedings of ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, 10-13 September 2006, Philadelphia, Pennsylvania, USA (p759-770).
- Tseng, H., Chang, C. & Li, J. (2008). Modular design to support green life-cycle engineering. *Expert Systems with Applications*, 34, 2524-2537.
- Vongbunyong, S. & Chen, W.H. (2015). *Disassembly automation*. Springer International Publishing.
- Xing, K., Abhary, K. & Luong, L. (2003). IREDA: An integrated methodology for product recyclability and end-of-life design. *The Journal of Sustainable Product Design*, 3, 149-172.

Zandin, K.B. (2003). *MOST work measurement systems* (3^e éd). New York: Marcel Dekker.

ANNEXE 1 – TABLEAU DE CALCUL DES COMPLEXITÉS POUR LE 1^{ER} CAS D'APPLICATION

Calcul complexité de l'assemblage														
Paramètres	Valeur 1	Valeur 2	Valeur 3	Valeur 4	Valeur 5	Valeur 6	Pondération		Vis-écrou	Vis	Rivets	Cantilever	Soudage	Colle
Outils	Auncun	Pistolet	Petit outil	Outils spéciaux	Gros outillage		20		3	2	3	1	4	3
Direction d'accès	Axe Z	Axe X/Y	>15 cm de prof	Par en dessous	Combiné	Non visible	25		1	1	1	1	2	1
Temps d'assemblage	10 sec	20 sec	30 sec	40 sec	50 sec	60 sec	35		4,8	2,3	4,1	1	1,7	2,2
Qualification des ouvriers	Aucune	10-20 sec	>30 sec	Discussion	Formation		10		1	1	1	1	5	3
Equipement requis	Aucun	Gants	Masque	Protection anti-feu	Filtrage de l'air	Combinaison	10		1	1	1	1	2	2
								Résultat	47,83	29,25	43,75	17,67	47,58	38,33
Nombre d'alternatives	6							Priorités	0,1151	0,1882	0,1258	0,3116	0,1157	0,1436

Calcul complexité du désassemblage - Désassemblage non destructif														
Paramètres	Valeur 1	Valeur 2	Valeur 3	Valeur 4	Valeur 5	Valeur 6	Pondération		Vis-écrou	Vis				
Force requise	0	20	40	60	80	100	20		3,3	3,3				
Type de fixation	Aucune	Une main	Deux mains	Pincés	Système	Automatisé	15		1	2				
Outils	Aucun	Pistolet	Outil simple	Outils du fabricant	Outils spéciaux	Improvisé	10		3	2				
Accessibilité	Axe Z	Axe X/Y	>15cm de prof	Par en dessous	Combiné	Non visible	15		1	1				
Temps de désassemblage	10 sec	20 sec	30 sec	40 sec	50 sec	60 sec	25		4,5	2				
Qualification des ouvriers	Aucune	10-20 sec	>30 sec	Discussion	Contacteur fabricant	Formation	10		1	1				
Equipement requis	Aucun	Gants	Masque	Protection anti-feu	Filtrage de l'air	Combinaison	5		2	2				
								Résultat	43,08	33,50	0,00	0,00	0,00	0,00

Calcul complexité du désassemblage - Désassemblage semi destructif														
Paramètres	Valeur 1	Valeur 2	Valeur 3	Valeur 4	Valeur 5	Valeur 6	Pondération				Rivets	Cantilever	Soudage	Colle
Résistance des matériaux	Très faible	Faible	Modérée	Intermédiaire	Elevée	Extrême	20				3 <td>3</td> <td>3</td> <td>3</td>	3	3	3
Type de fixation	Aucune	Une main	Deux mains	Pincés	Système	Automatisé	15				2	2	4	4
Outils	Aucun	Pistolet	Outil simple	Outils du fabricant	Outils spéciaux	Improvisé	10				3	3	5	5
Accessibilité	Axe Z	Axe X/Y	>15cm de prof	Par en dessous	Combiné	Non visible	15				1	2	2	2
Temps de désassemblage	10 sec	20 sec	30 sec	40 sec	50 sec	60 sec	25				2	1,4	0,8	0,8
Qualification des ouvriers	Aucune	10-20 sec	>30 sec	Discussion	Contacteur fabricant	Formation	10				2	2	2	2
Equipement requis	Aucun	Gants	Masque	Protection anti-feu	Filtrage de l'air	Combinaison	5				2	2	3	3
									Résultat	0,00	0,00	35,83	35,83	42,50
								Combiné	43,08	33,50	35,83	35,83	42,50	42,50
								Variation	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	3,00
								Corrigé	43,08	33,50	35,83	35,83	43,78	43,78
								Priorités	0,1502	0,1931	0,1806	0,1806	0,1478	0,1478

ANNEXE 2 - TABLEAU DE CALCUL DES PERTES DE VALEURS POUR LE 1^{ER} CAS D'APPLICATION

Cas possibles lors du désassemblage semi-destructif						Pondérations entre les cas				
Cas 1	Récupération des matériaux, matériaux identiques					Rapport de valeur entre la récupération des pièces et des matériaux	1			
Cas 2	Récupération des matériaux, matériaux différents									
Cas 3	Récupération des pièces, intactes apres désassemblage					Rapport de valeur entre la récupération totale et partielle des pièces	1			
Cas 4	Récupération des pièces, remise en état nécessaire									
Cas 5	Récupération partielle des pièces et récupération des matériaux									
Calcul des variations de valeurs engendrées par le semi-destructif										
Alternative	Cas	Perte volume 1 en %	Perte volume 2 en %	Rapport de valeurs entre 1 et 2	Rapport de volume entre 1 et 2	Coût de remise en état en %	Coût de remise en état en %	Rapport de valeur entre pièces	Rapport valeur entre pièce et matériau	Perte de valeur en %
Vis-écrou										0,00
Vis										0,00
Rivets	2	0	0	1						0,00
Cantilever	2	0	0	1						0,00
Soudage	2	3	3	1						3,00
Colle	2	3	3	1						3,00

ANNEXE 3 - TABLEAU DE CALCUL DES PERTES DE VALEURS POUR LA DEUXIÈME SITUATION ET NOUVEAU TABLEAU DE CALCUL DES COMPLEXITÉS DE DÉSASSEMBLAGE

Cas possibles lors du désassemblage semi-destructif						Pondérations entre les cas				
Cas 1	Récupération des matériaux, matériaux identiques					Rapport de valeur entre la récupération des pièces et des matériaux	10			
Cas 2	Récupération des matériaux, matériaux différents									
Cas 3	Récupération des pièces, intactes apres désassemblage					Rapport de valeur entre la récupération totale et partielle des pièces	1,82			
Cas 4	Récupération des pièces, remise en état nécessaire									
Cas 5	Récupération partielle des pièces et récupération des matériaux									
Calcul des variations de valeurs engendrées par le semi-destructif										
Alternative	Cas	Perte volume 1 en %	Perte volume 2 en %	Rapport de valeurs entre 1 et 2	Rapport de volume entre 1 et 2	Coût de remise en état en %	Coût de remise en état en %	Rapport de valeur entre pièces	Rapport valeur entre pièce et matériau	Perte de valeur en %
1										0,00
2										0,00
3	3									0,00
4	5		0			0			10	45,00
5	2	3	3	1						90,30
6	2	3	3	1						90,30

Calcul complexité du désassemblage - Désassemblage semi destructif															
Paramètres	Valeur 1	Valeur 2	Valeur 3	Valeur 4	Valeur 5	Valeur 6	Pondération	Sommes			Rivets	Cantilever	Soudage	Colle	
Résistance des matériaux	Très faible	Faible	Modérée	Intermédiaire	Elevée	Extrême	20	1			3	3	3	3	
Type de fixation	Aucune	Une main	Deux mains	Pinces	Système	Automatisé	15	17,30			2	2	4	4	
Outils	Aucun	Pistolet	Outil simple	Outils du fabricant	Outils spéciaux	Improvise	10	26,41			3	3	5	5	
Accessibilité	Axe Z	Axe X/Y	>15cm de prof	Par en dessous	Combiné	Non visible	15	32,68			1	2	2	2	
Temps de désassemblage	10 sec	20 sec	30 sec	40 sec	50 sec	60 sec	25	36,72			2	1,4	0,8	0,8	
Qualification des ouvriers	Aucune	10-20 sec	>30 sec	Discussion	Contacteur fabricant	Formation	10	40,75			2	2	2	2	
Equipement requis	Aucun	Gants	Masque	Protection anti-feu	Filtrage de l'air	Combinaison	5	Choix			2	2	3	3	
									40,7478243						
									Résultat	0,00	0,00	35,83	35,83	42,50	42,50
									Combiné	43,08	33,50	35,83	35,83	42,50	42,50
									Variation	0,00	0,00	0,00	45,00	90,30	90,30
									Corrigé	43,08	33,50	35,83	51,96	80,88	80,88
									Priorités	0,1858	0,2389	0,2234	0,1540	0,0990	0,0990

ANNEXE 4 - TABLEAU DE CALCUL DES COMPLEXITÉS POUR LE 2^{ÈME} CAS D'APPLICATION

Calcul complexité de l'assemblage												
Paramètres	Valeur 1	Valeur 2	Valeur 3	Valeur 4	Valeur 5	Valeur 6	Pondération		Vis	Rivets	Clips	Colle
Outils	Auncun	Pistolet	Petit outil	Outils spéciaux	Gros outillage		20		2	3	1	3
Direction d'accès	Axe Z	Axe X/Y	>15 cm de prof	Par en dessous	Combiné	Non visible	25		1	1	1	1
Temps d'assemblage	10 sec	20 sec	30 sec	40 sec	50 sec	60 sec	35		5	5	2,4	2,3
Qualification des ouvriers	Aucune	10-20 sec	>30 sec	Discussion	Formation		10		1	1	1	3
Equipement requis	Aucun	Gants	Masque	Protection anti-feu	Filtrage de l'air	Combinaison	10		2	2	2	2
								Résultat	46,67	50,67	27,50	38,92
Nombre d'alternatives	4							Priorités	0,2076	0,1912	0,3523	0,2489

Calcul complexité du désassemblage - Désassemblage non destructif												
Paramètres	Valeur 1	Valeur 2	Valeur 3	Valeur 4	Valeur 5	Valeur 6	Pondération		Vis			
Force requise	0	20	40	60	80	100	20		2,5			
Type de fixation	Aucune	Une main	Deux mains	Pinces	Système	Automatisé	15		2			
Outils	Aucun	Air gun	Outil simple	Outils du fabricant	Outils spéciaux	Improvisé	10		2			
Accessibilité	Axe Z	Axe X/Y	>15cm de prof	Par en dessous	Combiné	Non visible	15		1			
Temps de désassemblage	10 sec	20 sec	30 sec	40 sec	50 sec	60 sec	25		4,5			
Qualification des ouvriers	Aucune	10-20 sec	>30 sec	Discussion	Contacteur fabricant	Formation	10		1			
Equipement requis	Aucun	Gants	Masque	Protection anti-feu	Filtrage de l'air	Combinaison	5		2			
								Résultat	41,25	0,00	0,00	0,00

Calcul complexité du désassemblage - Désassemblage semi destructif												
Paramètres	Valeur 1	Valeur 2	Valeur 3	Valeur 4	Valeur 5	Valeur 6	Pondération			Rivets	Clips	Colle
Résistance des matériaux	Très faible	Faible	Modérée	Intermédiaire	Elevée	Extrême	20			3	3	3
Type de fixation	Aucune	Une main	Deux mains	Pinces	Système	Automatisé	15			2	2	2
Outils	Aucun	Air gun	Outil simple	Outils du fabricant	Outils spéciaux	Improvisé	10			2	3	3
Accessibilité	Axe Z	Axe X/Y	>15cm de prof	Par en dessous	Combiné	Non visible	15			1	2	2
Temps de désassemblage	10 sec	20 sec	30 sec	40 sec	50 sec	60 sec	25			1,3	1,5	1,5
Qualification des ouvriers	Aucune	10-20 sec	>30 sec	Discussion	Contacteur fabricant	Formation	10			2	2	2
Equipement requis	Aucun	Gants	Masque	Protection anti-feu	Filtrage de l'air	Combinaison	5			2	2	2
									Résultat	0,00	31,25	36,25
								Combiné	41,25	31,25	36,25	36,25
								Variation	0,00	0,00	0,00	0,00
								Corrigé	41,25	31,25	36,25	36,25
								Priorités	0,2176	0,2872	0,2476	0,2476

ANNEXE 5 : TABLEAU DE CALCUL VIERGE

Calcul complexité de l'assemblage														
Paramètres	Valeur 1	Valeur 2	Valeur 3	Valeur 4	Valeur 5	Valeur 6	Pondération		Alter 1	Alter 2	Alter 3	Alter 4	Alter 5	Alter 6
Outils	Auncun	Pistolet	Petit outil	Outils spéciaux	Gros outillage		20							
Direction d'accès	Axe Z	Axe X/Y	>15 cm de prof	Par en dessous	Combiné	Non visible	25							
Temps d'assemblage							35							
Qualification des ouvriers	Aucune	10-20 sec	>30 sec	Discussion	Formation		10							
Equipement requis	Aucun	Gants	Masque	Protection anti-feu	Filtrage de l'air	Combinaison	10							
								Résultat	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nombre d'alternatives								Priorités	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Calcul complexité du désassemblage - Désassemblage non destructif														
Paramètres	Valeur 1	Valeur 2	Valeur 3	Valeur 4	Valeur 5	Valeur 6	Pondération		Alter 1	Alter 2	Alter 3	Alter 4	Alter 5	Alter 6
Force requise	0	20	40	60	80	100	20							
Type de fixation	Aucune	Une main	Deux mains	Pincés	Système	Automatisé	15							
Outils	Aucun	Air gun	Outil simple	Outils du fabricant	Outils spéciaux	Improvisé	10							
Accessibilité	Axe Z	Axe X/Y	>15cm de prof	Par en dessous	Combiné	Non visible	15							
Temps de désassemblage							25							
Qualification des ouvriers	Aucune	10-20 sec	>30 sec	Discussion	Contacteur fabricant	Formation	10							
Equipement requis	Aucun	Gants	Masque	Protection anti-feu	Filtrage de l'air	Combinaison	5							
								Résultat	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Calcul complexité du désassemblage - Désassemblage semi destructif															
Paramètres	Valeur 1	Valeur 2	Valeur 3	Valeur 4	Valeur 5	Valeur 6	Pondération		Alter 1	Alter 2	Alter 3	Alter 4	Alter 5	Alter 6	
Résistance des matériaux	Très faible	Faible	Modérée	Intermédiaire	Elevée	Extrême	20								
Type de fixation	Aucune	Une main	Deux mains	Pincés	Système	Automatisé	15								
Outils	Aucun	Air gun	Outil simple	Outils du fabricant	Outils spéciaux	Improvisé	10								
Accessibilité	Axe Z	Axe X/Y	>15cm de prof	Par en dessous	Combiné	Non visible	15								
Temps de désassemblage							25								
Qualification des ouvriers	Aucune	10-20 sec	>30 sec	Discussion	Contacteur fabricant	Formation	10								
Equipement requis	Aucun	Gants	Masque	Protection anti-feu	Filtrage de l'air	Combinaison	5								
								Résultat	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
								Combiné	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
								Variation	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
								Corrigé	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
								Priorités	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

ANNEXE 7 : EXPLICATION DES TABLEAUX DE CALCUL

- **1^{ère} étape : Case rouge (Annexe 5):** La première étape consiste à remplir la case rouge qui sert à définir le nombre d'alternatives envisagées et qui vont être calculées par la suite.
- **2^{ème} étape : Cases bleu foncé (Annexe 5):** Il faut ensuite déterminer la plage de variation des temps d'assemblage et de désassemblage en fonction des temps obtenus. Les deux plages sont indépendantes. Une plage de variation doit englober au mieux les temps de toutes les alternatives. Si tous les temps sont compris entre 0 et 30 secondes on prendra alors comme plage de variation 0 – 30. Pour remplir les valeurs il suffit de diviser la plage de variation par 6 (nombre total de valeur), ce qui nous donne ici un pas de 5 secondes. Nous aurons alors en valeur 1, 5 secondes, en valeur 2, 10 secondes et ainsi de suite jusqu'à la valeur 6 de 30 secondes.
- **3^{ème} étape : Cases jaunes (Annexe 5):** Ensuite il va falloir remplir pour chacune des alternatives les cases jaunes qui correspondent aux valeurs retenues pour les paramètres. Par exemple, pour la colonne Alter 1 qui correspond à la première alternative et dans le tableau complexité d'assemblage. Les données et les valeurs correspondantes pour cette alternative sont les suivantes (la plage de variation des temps d'assemblage est de 0 à 30 secondes):
 - Outils : Main → valeur 1
 - Direction d'accès : Par en dessous → valeur 4
 - Temps d'assemblage : 22 s → valeur 4.4 (valeur intermédiaire)
 - Qualification des ouvriers : 10-20 s → valeur 2
 - Équipement requis : Masque → valeur 3

Il suffit de rentrer ses valeurs dans la colonne Alter 1. Nous obtenons ainsi [1 : 4 : 4.4 : 2 : 3] dans cette colonne. Les calculs sont faits automatiquement. Les lignes résultats correspondent au score obtenu pour une alternative sur une échelle de 0 à 100, 100 représentant un assemblage ou désassemblage extrêmement complexe. En ce qui concerne

le désassemblage, il faut utiliser le tableau adapté pour chacune des alternatives suivant le type de désassemblage utilisé.

- **4^{ème} étape : Cases violettes (Annexe 6) :** Lorsqu'un désassemblage semi-destructif est envisagé pour une alternative il est nécessaire d'utiliser le tableau de calcul des pertes de valeur. Il faut tout d'abord déterminer les rapports de valeurs. Les deux rapports ne sont pas obligatoires, cela dépend des cas dans lesquels se placent les alternatives. Le premier rapport est nécessaire pour les cas 1 et 2, le deuxième rapport est utile dans cas 5.
- **5^{ème} étape : Cases orange (Annexe 6) :** Pour chacune des alternatives il faut remplir la ligne correspondant. Suivant le cas choisit, les colonnes à remplir seront différentes. Les calculs de pertes sont effectués automatiquement et sont directement reportés dans le tableau de calcul des complexités afin de pondérer les résultats.
- **6^{ème} étape : Cases bleu clair (Annexe 5) :** Toutes les informations ont été prises en compte, il ne reste plus qu'à exploiter les lignes intitulées Priorités qui sont les valeurs à utiliser dans la méthode ANP.